SANJIANGPINGYUAN
NONGYE SHUIWENXITONG
FUZAXING CEDU
FANGFA YU
YINGYONG

三江平原农业水文系统复杂性测度方法与应用

刘东　周方录　王维国　戴春胜　著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

责任编辑：王德鸿　王　启

销售分类：水利水电工程

ISBN 978-7-5084-9370-1



定价：46.00 元

三江平原农业水文系统复杂性测度方法与应用

刘东 周方录 王维国 戴春胜 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

复杂性是区域农业水文系统的重要演化特征，已经成为水文领域中的研究热点。本书以复杂性测度方法为逻辑主线，以揭示区域农业水文系统动力学结构的复杂性特征为出发点，将复杂性科学引入到国家产粮核心区——三江平原农业水文水资源系统分析中，开展了熵理论、符号动力学、分形理论、小波理论等系统复杂性测度方法的研究与应用，对区域关键农业水文要素（地下水位、降水）复杂性进行了测度分析；对复杂农业水文要素发展态势进行了分析预测；进而提出了复杂性视角下的区域水资源可持续利用对策，为当地水资源可持续开发利用、粮食增产及农民增收提供了保障。

本书结合大量的实证分析对各种数据处理方法进行了详细的介绍，对于推动复杂性科学应用领域的纵深发展及解决三江平原水资源问题具有较强的理论指导意义，可供从事农业水土工程、水文水资源、环境工程、系统工程、管理科学及其他相关专业的教学、科研和管理人员借鉴与参考。

图书在版编目（CIP）数据

三江平原农业水文系统复杂性测度方法与应用 / 刘东等著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2011.12
ISBN 978-7-5084-9370-1

Ⅰ. ①三… Ⅱ. ①刘… Ⅲ. ①三江平原—农业—水文系统—复杂性—研究 Ⅳ. ①P641.623.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第281458号

书　名	三江平原农业水文系统复杂性测度方法与应用
作　者	刘东　周方录　王维国　戴春胜　著
出版发行	中国水利水电出版社 （北京市海淀区玉渊潭南路1号D座　100038） 网址：www.waterpub.com.cn E-mail：sales@waterpub.com.cn 电话：(010) 68367658（发行部）
经　售	北京科水图书销售中心（零售） 电话：(010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排　版	中国水利水电出版社微机排版中心
印　刷	三河市鑫金马印装有限公司
规　格	184mm×260mm　16开本　12.5印张　296千字
版　次	2011年12月第1版　2011年12月第1次印刷
印　数	001—900册
定　价	**46.00**元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

前言

系统复杂性是系统内部性质、结构和功能的综合表征，例如系统的非线性（不可叠加性）与动态性、多样性与多层性、非周期性与开放性、涌现性、不可逆性、自适应性、积累效应（初值敏感性）、奇怪吸引性及结构自相似性（分形性）等，都属于复杂性。20世纪80年代兴起的复杂性科学是一门研究复杂系统行为与演变规律的科学，被誉为“21世纪的科学”，已经成功应用于电力、医学、金融、教育、交通、资源、环境、社会等诸多领域中，具有广阔的应用前景。当然，作为一门新兴的交叉边缘学科，复杂性科学自身理论体系还不够完善，仍处于不断探索与发展之中。

系统复杂性测度是描述非线性时间序列携带信息量大小的重要参数，是系统复杂性的量化表征，一般包括系统分析与指标数据采集、可测度分析与测度方法选择、测度与评价几个步骤。系统分析与指标数据采集就是在明确系统要素、目标、环境与边界、层次结构的基础上，依据客观、全面、科学及可量化原则，构建能够表达系统复杂属性的指标体系，并进行全面数据采集；可测度分析与测度方法选择就是了解各种可能复杂性测度算法适宜性、优缺点、可改进性、数据阈值要求及能否实现可比化度量等，分析系统具有何种复杂性、哪些（种）算法可以测度此种复杂性、现有数据是否满足算法阈值要求，最后判断出系统复杂性是否可测度，并选用适宜测度方法；测度与评价就是运用所选择的方法对系统复杂性进行测度，并对系统复杂性程度、测度结果的物理意义与管理学启示及测度算法可靠性等进行评价分析。在上述系统复杂性测度过程中，复杂性测度算法是度量系统复杂性的核心。

农业水文系统是农业大系统的有机组成部分，在岩石圈、生物圈、大气圈和人类圈的共同作用下，不断与周围的自然与人文环境发生物质、能量、信息因素方面的交换和作用，由于这些环境的变化和不确定性，导致农业水文系统越来越呈现出显著的复杂性演化特征。建立在传统科学范式基础上的研究成果和假设已经越来越无法圆满解释、解决当今水文学领域中所面临的水资源短缺、水位下降及水质恶化等诸多复杂问题，引起了国内外学者的广泛关注和探索。而以复杂适应系统理论、涌现生成理论、混沌边缘理论及进

化计算理论为核心的复杂性应用技术理论体系突破了线性、均衡、简单还原的传统研究范式，极大地推动了科学的纵深发展，使得人类对复杂事物的认知水平上升到了一个崭新的阶段。因此，运用和借鉴复杂性科学理论，对区域农业水文系统复杂性测度理论及方法进行深入研究，在水文学研究领域中进行前沿性探索，具有重要学术价值。

三江平原是国家重要的商品粮基地，粮食生产能力约为100亿kg/a，约占黑龙江年粮食生产能力的20%左右，商品率高达75%以上，是实现黑龙江省“千亿斤粮食产能工程”及“全国新增1000亿斤粮食生产能力规划”战略目标的关键所在。三江平原是我国最大的淡水沼泽湿地集中分布区，2002年被列入《湿地公约》国际重要湿地名录，在世界上有重要影响。新中国成立后，三江平原共经历了四次垦荒高潮，加剧了耕地开垦与湿地保护之间的冲突，湿地资源正面临日益严峻的挑战，湿地面积日益萎缩，湿地的生态功能日益退化。为了解决土壤质地黏重、排水能力差、很容易形成涝灾而减产的问题，从20世纪80年代开始，三江平原掀起了打井种稻的热潮。

长期以来，三江平原由于盲目扩展水田面积，农业灌溉以超强度开采地下水为主，加之农民在经济利益驱使下过量施用化肥、农药，旱涝灾害频繁发生，已经诱发了地下水位下降、水环境恶化、水土流失加剧、湿地生态功能退化、粮食减产等严重问题，三江平原农业水资源开发利用中的复杂性特征日益明显，受到了国内学者的普遍关注。然而以往国内学者在研究三江平原农业水资源可持续利用问题时，往往忽略了系统自身的复杂性，导致难以充分挖掘复杂农业水文系统所蕴含的信息，研究成果难以真正实现区域农业水资源的可持续利用。此种背景下，著者期望本书提出的三江平原农业水文系统复杂性测度分析方法，可以丰富完善复杂性基础理论体系，为国内相关领域从事系统复杂性研究的科技工作者提供借鉴与参考；同时也期望本书提出的复杂性诊断框架下的农业水文系统发展态势分析及水资源可持续利用对策，可以为国内产粮核心区进行农业水资源可持续利用研究提供一种研究模式，为复杂水资源系统的有效管理及黑龙江省“千亿斤粮食产能工程”、“三江平原农业综合开发试验区”建设提供科学依据。

全书共分七章，第一章介绍了复杂性科学缘起、区域农业水文系统复杂性研究的目的、意义、进展及本书主要内容，由刘东负责撰写；第二章介绍了建三江分局的地形、地貌、气象、水文地质、土壤及水资源开发利用中存在的问题等基本情况，由刘东、戴春胜负责撰写；第三章介绍了目前较为常用的熵理论、符号动力学、分形理论等系统复杂性测度理论与方法，由刘东、

戴春胜负责撰写；第四章采用多种系统复杂性测度方法，对建三江分局关键农业水文系统要素（地下水埋深、降水）复杂性进行了综合测度分析，由周方录负责撰写；第五章采用国内较为先进的数据处理方法，构建了建三江分局复杂地下水埋深序列耦合预测模型，由刘东负责撰写；第六章采用国内流行的小波分析方法，分析了建三江分局复杂降水序列多时间尺度变化特征，由王维国负责撰写；第七章采用定量—定性分析相结合的方法，提出了复杂性视角下建三江分局水资源可持续利用对策，由周方录负责撰写。

在本书编写过程中，我们参阅、借鉴了许多有关于水文系统复杂性与发展态势方面的学术论文及专著，在此向各位作者表示衷心感谢。另外，本书编写工作的顺利完成还得到了建三江分局水务局赵清、周明，东北农业大学吕萍、刘萌、于苗等同志的大力协助，在此表示真诚的谢意。

由于本书是对三江平原产粮核心区水文系统复杂性研究的一次大胆尝试，加之编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，恳请同行专家和广大读者多提宝贵意见，给予批评指正，我们将在今后的研究工作中加以改进。

本书得到国家自然科学基金（No. 41071053）、中国博士后科学基金（No. 20080440832）、中国博士后科学基金特别资助（No. 201003410），高等学校博士学科点专项科研基金（No. 20102325120009）、黑龙江省自然科学基金（No. C201026）、黑龙江省教育厅科学技术研究项目（No. 11541024）、东北农业大学博士启动基金（No. 2009RC37）、黑龙江省高校节水农业重点实验室的联合资助。

著　者

2011 年 6 月

目　录

第一章　引　论

第一节　复杂性科学缘起与复杂性测度

一、复杂性科学缘起

系统复杂性是系统内部性质、结构和功能的综合表征，任何系统都具有复杂性，区别在于表现程度不同，当系统复杂性累积到一定程度时，就转化为复杂系统[1]。复杂系统具有非线性（不可叠加性）与动态性、多样性与多层性、非周期性与开放性、涌现性、不可逆性、自适应性、积累效应（初值敏感性）、奇怪吸引性及结构自相似性（分形性）等诸多复杂性特征[2,3]，致使运用传统科学认知复杂系统规律时显得力不从心。此种背景之下，复杂性科学应运而生，20 世纪 80 年代兴起的复杂性科学是一门研究复杂系统行为与演变规律的科学，被誉为“21 世纪的科学”[4,5]。复杂性科学突破了线性、均衡、简单还原的传统研究范式，极大地推动了科学的纵深发展，使得人类对复杂事物的认知水平上升到了一个崭新的阶段[2]。1984 年，美国成立了专门的复杂性研究机构——圣菲（Santa Fe）研究所，标志着复杂性科学范式的初步建立[6]。目前，圣菲研究所致力于构建以复杂适应系统（Complex Adaptive System，简称 CAS）理论、涌现生成理论、混沌边缘理论及进化计算理论为核心的复杂性应用技术理论体系，已经成为世界复杂性问题研究中枢[4]。而在国内，最早探索复杂性方法论的是我国著名科学家钱学森，他与戴汝为、于景元等学者共同提出了“开放的复杂巨系统理论”，认为“复杂性实际上是开放的复杂巨系统的动力学特性”，并从方法论的角度提出了“从定性到定量的综合集成法”[3,4]，为复杂性科学的发展做出了卓越贡献。正是在这些科学先驱的引领下，使得复杂性科学逐步得到学术界的认可，并广泛应用于诸多领域中。当然，作为一门新兴的交叉边缘学科，复杂性科学自身理论体系还不够完善，仍处于不断探索与发展之中。

二、复杂性测度

复杂性测度是描述非线性时间序列携带信息量大小的重要参数[7]，是系统复杂性的量化表征。随着复杂性科学的发展，已经形成了多种系统复杂性测度方法，其中，较为流行的系统复杂性测度方法见表 1-1，具体算法详见后述。

表 1-1　　复杂性测度方法一览表

方　法	类　型
熵理论	信息熵[8]、近似熵[9]、样本熵[10]、排列熵[11]、联合熵[12]、多尺度熵[13]、小波熵[14]等

续表

方　法	类　　型
符号动力学	二值粗粒化、多值粗粒化、等概率粗粒化算法[15]等
分形理论	极差分析分形理论[16]、小波分形理论[17]、多重分形理论[18]、小波多重分形理论[19]等
混沌理论	关联维数G－P算法[20]、小波G－P算法[21,22]、斜面滤波点相关算法[23]、快速算法[24]等

第二节　农业水文系统复杂性研究的目的和意义

一、区域农业水文系统复杂性研究已经成为水文学领域中的研究热点

农业水文系统是农业大系统的有机组成部分，对于区域社会经济可持续发展及粮食生产有着重要的影响。随着人口的不断增加和经济的飞速发展，人类对农业水文系统的干扰强度不断增加。在岩石圈、生物圈、大气圈和人类圈的共同作用下，区域农业水文系统越来越表现出随机、非线性、混沌等复杂特征[17,25]。尤其是近几十年来，随着太阳黑子活动、厄尔尼诺现象、温室效应、土地沙漠化、森林面积锐减影响的日益加剧，全球社会经济发展市场化、信息化、一体化趋势日益明显，导致区域农业水文系统的复杂性特征日益凸显[26]。建立在传统科学范式基础上的研究成果和假设已经越来越不能圆满地解释或解决当今水文学领域中所遇到的水资源短缺、水位下降及水质恶化等诸多复杂问题，引起了国内外学者的广泛关注和探索。复杂性科学是一门20世纪80年代年发展起来的用以研究复杂性和复杂系统的新兴综合性交叉学科[27-30]，已经成功应用于电力[31,32]、医学[33,34]、金融[35,36]、教育[37,38]、交通[39,40]、资源[41,42]、环境[43,44]、社会[45,46]等诸多领域中，具有广阔的应用前景。随着复杂性科学的产生，具有鲜明前沿性、交叉性和挑战性的区域农业水文系统复杂性研究已经成为当今水文学领域中研究的一个热点。因此运用和借鉴复杂性理论，对区域农业水文系统复杂性测度理论及方法进行深入研究，在水文学研究领域中进行前沿性探索，可以为区域农业水资源优化调控提供重要的科技支撑。

二、复杂性是区域农业水文系统演化的重要特征，复杂性测度方法研究具有重要学术价值

作为农业大系统的重要组成部分，农业水文系统不断与周围的自然与人文环境发生物质、能量、信息因素方面的交换和作用，由于这些环境的变化和不确定性，导致农业水文系统越来越呈现出显著的复杂性演化特征[47]。农业水文系统复杂性分析基础理论和资料信息的严重不足，在一定程度上限制了农业水文系统复杂性测度理论的发展[48]。从系统论观点来看，区域农业水文系统是一个高维非线性、开放性复杂系统，其边界条件、初始条件及系统要素都十分复杂，如图1－1所示；从信息论观点来看，农业水文系统存在监测数据不完整等诸多的未知和不确定性问题。水文监测数据不仅蕴含了系统过去行为的信息，而且还隐藏着系统未来演化的信息。目前，农业水文系统研究主要采用半经验、概念性或随机性理论，而客观世界中的水文变化过程则是确定性与不确定性、突发性与无序性

等各种成分交织的复杂现象[49]，从而使得简单的理论和手段已不适宜于人类活动驱动下日趋复杂化的农业水文系统的研究。复杂性科学的发展，为水文学研究领域注入了新的生机，它将在农业水文系统复杂性研究中扮演重要角色[50]。同时，复杂性测度方法具有计算简便、对序列样本数等条件要求较低等优点，因而更具有实用价值，是水文学研究领域中的新型工具[51]。区域农业水文系统复杂性测度方法研究可以丰富完善复杂性基础理论体系，为相关领域复杂性研究提供借鉴，具有重要的学术价值。

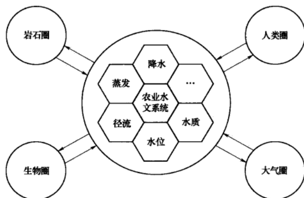


图 1-1　农业水文复杂系统示意图

三、黑龙江"千亿斤粮食产能工程"及"三江平原农业综合开发试验区"建设的需要

2008 年 12 月，黑龙江省委经济工作会议提出了着力建设"八大经济区"、实施"十大工程"的战略构想，其中包括"三江平原农业综合开发试验区"建设和"千亿斤粮食产能工程"[52]。2009 年 11 月，国家发展和改革委员会发布了《全国新增 1000 亿斤粮食生产能力规划（2009～2020 年）》，提出到 2010 年，全国粮食生产能力稳定在 5000 亿 kg 以上，到 2015 年，全国粮食生产能力达到 5300 亿 kg 以上，到 2020 年，全国粮食生产能力达到 5500 亿 kg 以上[53]。其中，东北地区为产粮核心区，承担新增粮食产能任务 150.5 亿 kg，占全国新增产能的 30.1%[54]。

三江平原位于黑龙江省东部，为黑龙江、松花江、乌苏里江的冲积平原，地理坐标为北纬 45°01′05″～48°27′56″，东经 130°13′1″～135°05′26″[55]，土地总面积 10.9 万 km^2，其中，山丘区占 43%，平原区占 57%，耕地面积 378 万 hm^2[56]，是国家重要的商品粮基地。区内包括哈尔滨、牡丹江、佳木斯、鹤岗、双鸭山、七台河、鸡西所辖的 23 个县(市)、52 个国营农场及 8 个森林工业局[57]。三江平原地势低平，耕地集中连片，适宜发展规模化现代农业，田间机械化率高达 80%以上[58]。区内土壤肥沃，水、肥、光、热资源丰富，水地资源基本平衡[59]，适宜种植水稻、玉米、大豆、小麦等农作物。目前，三江平原粮食生产能力约为 100 亿 kg/a[60]，约占黑龙江年粮食生产能力（2010 年为 501.3 亿 kg[61]）的 20%左右，商品率高达 75%以上[58]。因此，三江平原是东北的大粮仓，是

实现黑龙江省“千亿斤粮食产能工程”及《全国新增1000亿斤粮食生产能力规划（2010～2020年）》战略目标的关键所在。

三江平原是我国最大的淡水沼泽湿地集中分布区[62]，2002年被列入《湿地公约》国际重要湿地名录[63]，在世界上有重要影响。但长期以来，在高强度农业开发的影响下，三江平原的湿地资源正面临日益严峻的挑战。新中国成立以后，在“以粮为纲”[64]发展模式的驱动下，三江平原共经历了1949～1954年、1956年和1958年、1969～1973年及20世纪70年代末四次垦荒高潮[60]，加剧了耕地开垦与湿地保护之间的冲突。对三江平原不同时间节点沼泽湿地面积与耕地面积进行统计，见表1-2[64,65]。

表1-2　　三江平原沼泽湿地与耕地面积变化情况

年　份	1949	1954	1976	1986	1995	2000	2005
沼泽湿地面积（万 hm^2）	534.50	352.59	223.06	138.93	117.34	95.87	80.99
耕地面积（万 hm^2）	78.60	171.34	358.67	452.49	494.05	556.88	600.16
时段	1949～1954年	1954～1976年	1976～1986年	1986～1995年	1995～2000年	2000～2005年	1949～2005年
沼泽湿地面积年平均变化率（%）	−6.81	−1.67	−3.77	−1.73	−3.66	−3.10	−1.52
耕地面积年平均变化率（%）	23.60	4.97	2.62	1.02	2.54	1.55	11.85

注　表中负号表示面积减少。

同时，三江平原由于缺少控制性工程，长期以来，地表水利用率不高，当地产地表水利用率仅为6%，过境水利用率仅为24%[66]，因此，农业灌溉主要以开发地下水为主。为了解决土壤质地黏重、排水能力差、很容易形成涝灾而减产的问题[67]，从20世纪80年代开始，三江平原掀起了打井种稻的热潮[68]，水田面积逐年增长，见表1-3[69,70]。由表1-3可知，1995年，三江平原水田面积为41.2万 hm^2，相比较1986年的水田面积（57.7万 hm^2）减少了16.5万 hm^2，这主要是由于前期大面积垦荒、后期无力耕种而撂荒所导致的[71]。由于水田面积的迅速增加，地下水开采量也迅速增加，根据《黑龙江省水利建设统计资料》，1986年，井灌面积为7.7万 hm^2，地下水开采量接近6亿 m^3，到2005年，井灌面积发展到68.6万 hm^2，地下水开采量激增到46.1亿 m^3[72]，几乎全部用来灌溉水稻，再加上人为浪费严重以及管理不善，使得三江平原地下水位普遍下降。《国家粮食安全中长期规划纲要（2008～2020年）》中指出，三江平原近10年来地下水位平均下降2～3m，部分区域下降3～5m[73]，充分说明了三江平原不合理的农业开发模式对水资源系统健康的严重影响。

表1-3　　三江平原水田面积变化情况

年　份	1981	1986	1995	2000	2005
水田面积（万 hm^2）	7.0	57.7	41.2	116.4	150.9
时段	1981～1986年	1986～1995年	1995～2000年	2000～2005年	1981～2005年
水田面积年平均变化率（%）	144.9	−3.2	36.5	5.9	85.7

注　表中负号表示面积减少。

综上所述，长期以来，三江平原盲目扩展水田面积，农业灌溉以超强度开采地下水为主，加之农民在经济利益驱使下过量施用化肥、农药，旱涝灾害频繁发生，已经诱发了地下水位下降、水环境恶化、水土流失加剧、湿地生态功能退化、粮食减产等严重问题，三江平原农业水资源开发利用中的复杂性特征日益明显，受到了国内学者的普遍关注。然而以往国内学者在研究三江平原农业水资源可持续利用问题时，往往忽略了农业水文系统的复杂性，导致难以充分挖掘农业水文要素变化过程所蕴含的信息，研究成果难以真正实现区域农业水资源的可持续利用。因此，深入研究三江平原农业水文系统复杂性测度分析方法，揭示农业水文系统复杂性特征，进而分析农业水文要素发展态势并提出相应对策是非常重要的，可以为三江平原农业水资源可持续利用提供科学依据，为国内产粮核心区进行农业水文系统复杂性研究提供一种研究模式，同时，对于推动黑龙江省“千亿斤粮食产能工程”、“三江平原农业综合开发试验区”建设及保障我国粮食安全具有重要理论与现实意义。

第三节　农业水文系统复杂性与发展态势研究进展

全球变化及人类活动导致了农业水资源开发利用过程中的复杂性逐渐增加[25]，农业水文要素复杂性研究正在升温。特别是粮食危机和水危机的日益加剧，作为区域经济社会发展的重要影响因子，农业水文系统复杂性与发展态势研究更是得到了国内外学者的普遍关注。复杂性科学是相对于牛顿时代的简单系统而言的，它所探讨的是复杂系统中各组成部分之间相互作用所表现出的特性[74]。复杂性科学是“21 世纪的科学”，尽管目前它仍处在萌芽和发展阶段，但已经引起了科学界的广泛重视[3,5]。系统复杂性往往是通过系统构成要素的复杂变化反映出来的，这就使得农业水文系统复杂性可以通过农业水文系统要素复杂性来表征[75,76]。农业水文系统发展态势研究主要涉及地下水位、降水、蒸发等农业水文要素的时空变异规律、多时间尺度变化特征分析等内容，是区域水资源科学管理的重要依据，历来受到国内外学者的高度重视。

一、国内研究进展

（一）水文要素复杂性研究

在水文要素复杂性研究方面，四川大学水利水电学院在全国处于领先水平，取得了一些前沿性的研究成果。李贤彬等在水文时间序列分析中引入了子波变换法，通过对水文时间序列的离散子波变换（Discrete Wavelet Transform，简称 DWT），给出了计算水文过程变化特征的信息量系数（Information Cost Function，简称 ICF）法[77]，同年，他们在水文序列的研究中又引入了 Hurst 系数的子波估计法，计算了实测年最大洪峰流量序列 Hurst 系数的子波估计值[78]；张少文等较系统地论述了分形理论在水文水资源中水系河网结构和流域地形地貌及其演变、河床表面形态、降水时空分布、洪水时空变化、径流过程及土壤水下渗等方面的应用，并探索性地指出了应用中应注意的问题[79]；王文圣等探讨了小波分维估计法的影响因素和稳定性，将基于离散小波变换的水文序列分维估计方法用于黄河三门峡站年径流和长江屏山站日平均流量的分维计算[80]，同年，他们将基于连续小波

变换的水文序列分维估计方法用于黄河流域主要水文站年径流的分维计算[81]，还采用基于小波消噪的符号动力学方法，运用 Lempel－Ziv 算法计算了长江、黄河流域年径流的复杂度[75]；余姝萍等采用网格法计算了岷江上游紫坪铺站、姜射坝站、桑平站的日径流过程分形维数，发现各测站间日径流过程分维数的变化趋势基本一致。她将姜射坝站日径流过程线分维数与岷江上游生态脆弱性结合进行分析，认为分维在一定程度上还可以是生态脆弱性的表征，为水文学和生态学研究提供了新思路[82]；刘起方等运用重标极差（R/S）分析方法对南桠河冶勒水库月平均径流复杂的非线性特性隐藏下的有序性（持续性特性）进行了研究[83]。另外，佟春生等采用近似熵对黄河径流序列的复杂性进行了分析，指出对黄河上游实测径流变化的研究应以洪水的变化为主，对天然径流变化的分析应以干旱（断流）为主，而对黄河下游实测及天然径流变化的研究均应以干旱（断流）为主[84]。同年，他们采用基于遗传密码粗粒化函数的 Lempel－Ziv 算法对黄河干流上游的贵德站和兰州站的径流序列变化进行了实时跟踪和状态诊断，结果表明：自然环境、人类活动及空间距离是决定径流变化的三个基本要素，且尤以人类活动影响最为直接[85]。他们还采用复杂度 C_1（反映事物随机性程度）、C_2（反映事物混沌特征）对黄河干流上游的贵德站和兰州站、下游的花园口站的河川径流序列进行了诊断分析，结果表明：黄河干流径流序列确定、随机和混沌成分共存，以随机性为主，人类活动的影响总体使得径流变化的随机和混沌特性增大，且下游的随机成分大于上游，上游的混沌成分大于下游[86]；邓自旺等采用符号动力学理论分析了我国降水量复杂度空间分布特征。结果表明：月降水量序列的复杂度小于季节和年降水量序列，从空间分布来看，降水量变化的复杂度为西部、北部大于南部和东部，我国东南沿海地区降水量变化的复杂度最大[87]；郝成元等采用排列熵对云南省南部地区降水复杂性进行了分析，指出降水熵值的空间格局不仅指示了水汽来源的方向，而且反映了降水空间递变强度的区域差异[88]；李双成等采用近似熵对全国 648 个台站 1961～1990 年日降水距平序列的复杂性进行了分析，发现降水复杂度高值区出现在海拔较高、地表起伏较大的区域，说明地形条件是塑造降水系列复杂性的重要因素[89]；彭涛等采用非线性动力学参数样本熵方法，对东江干流龙川、河源和博罗 3 个主要控制水文站的月径流序列复杂性进行了分析。结果表明：东江干流月径流序列复杂度具有空间差异性，整体呈从上游到下游逐渐增加的趋势；径流序列复杂度动态变化较大并具有一定的周期性，反映出自然环境变化特别是人类活动影响导致了水文动力学系统结构的变化[90]；魏一鸣等和杨思全等分别应用分形理论对九江年降水序列和新疆河冰湖突发洪水洪峰序列的关联维和混沌特性进行了研究[91,92]；陈云浩等、柳景青、李国良等及金云翔等分别应用混沌理论对上海市旬降水序列、杭州市日用水量、时用水量及各日典型时段（9 时、2 时）用水量序列、三江平原别拉洪水文站月降水序列及泾河流域西峰镇站月降水序列的混沌特性进行了分析[93-96]；陈引锋等和武荣等也分别应用混沌理论对黑河日径流量序列及昕水河月径流量序列的混沌特性进行了分析[97,98]。

（二）水文要素发展态势研究

在水文要素发展态势方面，全国高校都在陆续开展研究。邹文安等、赵瑜等及王其虎等利用人工神经网络（ANN）技术，分别建立了吉林省农安水文站枯季径流量序列、四川省大桥水库入库月径流量序列、广州市流溪河水库 5～7 月平均径流量序列的 BP 神经

网络预测模型[99-101]；于国荣等、郭晓亮等将混沌理论与支持向量机（Support Vector Machin，简称 SVM）相结合，分别引入径向基核函数及模糊隶属度函数，建立了长江宜昌站、寸滩站月径流量序列的混沌支持向量机及混沌模糊支持向量机预测模型[102,103]；师彪等对传统粒子群优化算法进行了改进，提出了动态调整粒子群优化（Dynamic Adjustment Particle Swarm Optimization，简称 DAPSO）算法，结合霍尔特-温特斯线性季节性模型，建立了石泉水库年径流量和月径流量序列动态调整粒子群算法-霍尔特-温特斯线性季节性模型[104]。2000 年以来，东北农业大学结合区域优势，在农业水文要素预测建模、多时间尺度分析等方面有较多的积累。付强等采用人工神经网络技术及随机理论建立了三江平原建三江分局创业农场井灌水稻区逐月地下水埋深 BP 神经网络预测模型及非平稳时间序列模型[105,106]，采用混沌理论分析了三江平原建三江分局创业农场 2 队、10 队、17 队及洪河农场 601 号长观井地下水埋深序列的混沌特性，并建立了 4 个地下水埋深序列的基于关联度的局域加权线性回归预测模型[107]；刘东等分别采用随机理论、小波理论、人工神经网络等方法建立了三江平原红兴隆分局 853 农场逐月地下水埋深时间序列模型、小波神经网络模型及小波随机耦合模型[108-110]，采用小波理论、最近邻原理、随机理论等方法建立了三江平原红兴隆分局 853 农场年降水小波最近邻抽样回归耦合预测模型、小波随机耦合模型、基于小波消噪的随机预测模型及基于小波消噪的月降水季节性时序预测模型[111-114]，采用小波理论分析了三江平原红兴隆分局 853 农场年降水序列及主汛期降水序列的多时间尺度变化特征[115,116]；李明皓等、孟凡香等采用小波理论分别对黑龙江省乌云河流域东风站年平均径流量序列及查哈阳灌区水稻生育期（5～9 月）降水序列的多时间尺度特征进行了分析[117,118]。另外，邵年华等利用核主成分分析（Kernel Principal Component Analysis，简称 KPCA）提取输入数据的特征信息，并将特征信息作为最小二乘支持向量机（Least Square Support Vector Machine，简称 LSSVM）的输入变量，建立了新疆和田县月蒸发量核主成分支持向量机预测模型[119]；魏光辉等采用灰色关联分析方法筛选出影响水面蒸发的主要因子，建立了新疆尉犁县旬水面蒸发与主要影响因子之间的多元线性回归预测模型[120]；买买提·阿布都拉等、赵恒和等及杨保华等分别采用小波分析方法对新疆和田市蒸发量序列、青海省共和盆地蒸发量序列及云南干热河谷地区的元谋、宾川、元江、潞江坝 4 个典型代表站的蒸发量序列进行了多时间尺度分析[121-123]。

二、国外研究进展

（一）水文要素复杂性研究

国外的水文要素复杂性研究起步较早，取得了大量的研究成果。但和国内一样，也主要是以混沌和分维理论为基础来研究水文要素的复杂性。1987 年，Hense A 等首次提出降雨序列可能存在混沌，利用关联维数法分析了 Nauru 岛 1008 个月降雨量资料组成的序列，开辟了混沌分析方法应用于水文要素复杂性测度的先河[124,125]。接下来，Jayawardena A W 等、Puente C E 等、Porporato A 等、Sivakumar B 等分别应用 Lyapunov 指数法、Kolmogorov 熵法、关联维数法、伪临近法及非线性预测法分析了中国香港地区 3 个日降雨量序列和 2 个日径流量序列、Boston 城的日降雨量序列、意大利 Po 河支流 Dora Baltea 河的日径流量序列及新加坡 6 个日降雨量序列[126-130]，结果表明：日降雨量及日径流量序

列均存在混沌特性；Sivakumar B 等采用关联维数法对美国密西西比州 Leaf River 盆地连续双倍辨率（6h、12h、24h、48h、96h、192h）降雨序列进行了分析，结果表明：该区域降雨转换中存在混沌特性[131]；Gaume E 等采用关联维数法对法国巴黎周围的 5～10min 降水解集权重序列进行了分析，结果表明：该区域降水不存在低维混沌特性，与很多学者的前期研究结果相矛盾，他们认为，这可能是由于数据集时间分辨率、气候条件和降水发生机制、数据集大小影响等原因导致的[132]；Ng W W 等认为数据集中存在异常值会影响到水资源规划、运营、管理等决策过程，采用自相关函数、互信息、功率谱分析、相空间重构、关联维数、替代性检测及 Hurst 系数等混沌分析技术对加拿大安大略省的 Saugeen 河日径流量序列进行了研究。结果表明：所研究径流量序列具有类随机性波动，异常值的存在增加了序列的复杂性[133]；Millán H 等采用 TISEAN 软件包、伪近邻法对厄瓜多尔 Pastaza 省亚马逊河流域 6 个日气象变量序列（降水量、相对湿度、蒸发量、最低气温、日照百分率、蒸降比）的演化规律进行了分析，结果表明：所研究序列的最大李雅普诺夫指数均为正值，说明这些序列均存在混沌特性[134]。

（二）水文要素发展态势研究

国外完善的水文信息监测体系、开放的数据共享平台为学者在水文要素发展态势研究方面进行前沿性探索提供了坚实的数据基础，因而积累了大量的值得借鉴的研究成果。TRIPATHI M P 等结合印度遥感卫星（IRS－1B－LISS－Ⅱ）数据，采用 GIS 技术和数字高程模型（Digital Elevation Model，简称 DEM），提取了印度比哈尔邦赫札里巴克区 Nagwan 流域的流域面积、形状、平均坡度、干流河道斜率、土地利用结构、水文土壤群及曲线数字等资料，建立了该区的地表径流经验预测模型[135]；Méndez M C 等建立了西班牙西北部 Xallas river 流域的月平均径流量序列博克斯-詹金斯预测模型、日径流量序列博克斯-詹金斯预测模型及 ANN 预测模型，结果表明：ANN 模型预测效果优于博克斯-詹金斯模型[136]；Trivedi H V 等将灰色系统理论与最小二乘法（用于估计模型参数）相结合，建立了印度恰尔肯德邦 Kothuwatari 流域暴雨径流量序列灰色预测模型[137]；Nagler T 等采用积雪量遥感数据和气象数据同化方案，对气象监测数据、数值天气预报及雪量图进行了均化处理，建立了奥地利阿尔卑斯山地区 Ötztal 流域的融雪径流预测模型[138]；Patil J P 等采用美国农业部自然资源保护局曲线数字（Natural Resources Conservation Services Curve Number，简称 NRCS－CN）技术与 GIS 技术进行耦合分析，建立了印度恰尔肯德邦 Chotanagpur 高原 Banha 流域地表径流量序列预测模型[139]；Remesan R 等认为模拟复杂径流量过程时，应考虑序列的类型、长度及是否需要将原始信号分解为不同频段等问题，他们将 γ 检验（用于确定输入数据的维数和长度）、小波变换（用于将输入信号分解为不同频段）及人工神经网络技术相结合，建立了英国西南部 Brue 流域的日径流量序列混合预测模型[140]；Daliakopoulos I N 等、Nayak P C 等、Banerjee P 等及 Mohanty S 等分别采用人工神经网络（ANN）技术对希腊克里特岛美沙瑞流域逐月地下水位、印度安得拉邦东戈达瓦里区逐月地下水位、纳尔贡达区 Kurmapally 流域地下水位、印度奥里萨邦 Kathajodi River 流域典型河心滩 Bayalish Mouza 的逐周地下水位进行了预测[141-144]；Chen Z H 等认为地下水位的变化与含水层特性、地下水补给方式、补给距离等密切相关，他们根据水平衡模型和地下水流模型，建立了加拿大马尼托巴省碳酸盐含水

层响应气候变量的地下水位经验统计模型[145]；Moukana J A 等首先根据美国陆地卫星 5 号（Landsat 5）的 TM 影像和美国陆地卫星 7 号（Landsat 7）的 ETM+影像，采用线性光谱混合法分析了日本九州熊本平原土地覆被的变化，然后采用地质统计分析法识别、去除地下水位监测数据中的趋势成分，构建地下水空间插值模型，最后建立了该区地下水位多元回归预测模型，统计检验结果表明：从水田到城市地区土地覆被的变化对补给区内地下水位下降具有重要影响[146]；Valverde Ramírez M C 等采用巴西国家空间研究所天气预报和气候研究中心运行的 ETA 模型生成的气象数据（位温、风垂直分量、比湿、气温、可降水分、相对涡度、水汽通量散度）作为网络输入，以降水数据作为网络输出，构建了巴西圣保罗州 6 个地点（瓜鲁柳斯、坎皮纳斯、包鲁、普鲁登特总统城、里贝朗普雷图 5 个城市的机场及 Astronômico e Geofísico 学院）日降水序列的人工神经网络预测模型[147]；Salman A 等利用不同盐度、水温、气温、风速条件下的海水蒸发率实验数据，建立了带有梯度下降算法的海水蒸发率神经网络预测模型及基于神经网络和遗传算法的海水蒸发率混合预测模型，结果表明：混合预测模型精度更高[148]；Andreo B 等采用功率谱分析、相关分析及连续小波分析技术，对伊比利亚半岛南部西班牙气象、水文站监测数据（降水、气温、泉流量）序列进行了分析，结果表明：降水与气温序列年周期特性已经延续了 100 多年，同时，降水与气温序列也存在较弱的 0.5 年、2.5 年及 5 年的周期，多年尺度的周期可能是由于气候变化或北大西洋涛动引起的[149]。

三、国内外研究成果评析

综合上述，尽管国内外学者在水文系统复杂性及水文系统发展态势研究方面取得了大量成果，但从水文复杂巨系统[150,151]的角度看，该方面研究存在以下问题：

（1）从水文系统复杂性研究尺度与基础数据看，侧重于流域或城市尺度的研究多，而侧重于粮食主产区尺度的少，侧重于径流量、降水量序列的多，而侧重于水文复杂巨系统最为活跃和敏感的地下水子系统[152,153]要素——地下水埋深序列的少，导致复杂性测度理论体系存在缺陷，因此，粮食主产区尺度下农业水文系统复杂性亟待研究。

（2）从水文系统复杂性测度方法来看，采用单一方法的多，而多种方法相结合的少，导致难以充分挖掘水文要素序列所蕴含的复杂性信息，因此，水文系统复杂性耦合测度分析方法亟待研究。

（3）从水文系统发展态势分析方法来看，单独作发展态势分析的多，而将水文系统复杂性诊断与水文系统发展态势分析整合进行研究的少，导致分析结果实用性和指导性不足，因此，复杂性视角下的水文系统发展态势分析亟待研究。

第四节　本书的主要研究内容

针对上述国内外农业水文系统复杂性与发展态势研究中所存在的问题，本书以三江平原产粮核心区——黑龙江省农垦总局建三江分局（以下简称建三江分局）为例，深入研究农业水文系统中关键水文要素（地下水埋深、降水）复杂性测度方法及水文要素发展态势，进而提出相应对策。主要研究内容如下：

一、三江平原农业水文系统复杂性测度及空间变异规律研究

采用信息量系数、近似熵、小波理论、分形理论、符号动力学等方法，对三江平原关键农业水文要素（地下水埋深、降水）复杂性进行诊断，通过对比分析和参数调整，率定最优化参数，计算综合复杂度指数，确定研究区域地下水埋深序列与季节降水序列复杂性排序，揭示复杂性空间变化规律。

二、基于复杂性测度的三江平原农业水文过程发展态势研究

采用随机水文学、小波理论、灰色理论、经验模态分解、人工神经网络等方法，建立研究区域复杂地下水埋深序列数学预测模型，揭示当地地下水埋深时间变化规律；采用小波理论，分析研究区域复杂季节降水序列多时间尺度变化特征，揭示当地旱涝变化趋势。

三、复杂性视角下三江平原水资源可持续利用对策研究

结合复杂地下水埋深序列变化规律及复杂季节降水序列旱涝变化趋势，参考国内外成功经验，采用定性分析与定量分析相结合的方法，从管理、技术和工程层面上提出相应对策，为研究区域水资源科学管理及可持续利用提供科学依据。

参 考 文 献

[1] 彭纳揆，邹素文．论系统的复杂性和复杂系统［J］．系统科学学报，2006，14（1）：10－13，91.

[2] 宋学锋．复杂性、复杂系统与复杂性科学［J］．中国科学基金，2003（5）：262－269.

[3] 吴今培．复杂性科学与现代管理［J］．五邑大学学报（自然科学版），2009，23（3）：1－7.

[4] 黄欣荣．复杂性方法的兴起［J］．科学·经济·社会，2010，28（3）：90－94.

[5] 黄欣荣，吴彤．复杂性研究的若干方法论原则［J］．内蒙古社会科学（汉文版），2004，25（2）：75－80.

[6] 李双成，王羊，蔡运龙．复杂性科学视角下的地理学研究范式转型［J］．地理学报，2010，65（11）：1315－1324.

[7] 朱家富，杨浩，何为．基于高阶复杂性测度的心率变异信号分析［J］．生物物理学报，2004，20（3）：193－197.

[8] 邵朝红，邢莉燕，孙亮．信息熵在工程造价风险分析中的应用研究［J］．浙江建筑，2010，27（3）：76－78.

[9] 赵海峰，刘树林，顾孝宋．基于近似熵的往复压缩机气阀故障复杂性测度分析［J］．化工机械，2010，37（3）：296－298，315.

[10] 张秀，徐桂芝，杨硕．磁刺激足三里脑电复杂度研究［J］．中国生物医学工程学报，2009，28（4）：620－623.

[11] 赵小磊，任明荣，张亚庭，等．基于排列熵的心电信号非线性分析［J］．现代电子技术，2010，（19）：90－93.

[12] 张勇，关伟．基于联合熵和C0复杂度的交通流复杂性测度［J］．计算机工程与应用，2010，46（15）：22－24，33.

[13] 葛家怡，周鹏，赵欣，等．脑电信号的多尺度熵分析［J］．计算机工程与应用，2009，45（10）：13－15，19.

［14］ 王宏，赵海滨，刘冲．采用小波熵和频带能量提取脑电信号特征［J］．吉林大学学报（工学版），2011，41（3）：828－831．
［15］ 张佃中．Lempel－Ziv复杂度算法中粗粒化方法分析及改进［J］．计算物理，2008，25（4）：499－504．
［16］ 张晓伟，沈冰，孟彩侠．和田绿洲水文气象要素分形特征与R/S分析［J］．中国农业气象，2008，29（1）：12－15．
［17］ 王文圣，丁晶，李跃清．水文小波分析［M］．北京：化学工业出版社，2005．
［18］ 石志广，周剑雄，赵宏钟，等．海杂波的多重分形特性分析［J］．数据采集与处理，2006，21（2）：168－173．
［19］ 钟维年，卢一相．基于小波变换的薄膜显微图像多重分形分析［J］．电子测量技术，2008，31（9）：6－9，13．
［20］ 李彬彬．非线性心音时间序列的关联维数［J］．上海电机学院学报，2010，13（4）：201－204，210．
［21］ 刘海峰，龚欣，王亦飞，等．一种计算关联维数的方法及其在氢气射流中的应用［J］．化工学报，2002，53（12）：1294－1299．
［22］ 刘景夏，胡冰新，单华宁，等．一种基于小波包变换的关联维数计算方法［J］．解放军理工大学学报（自然科学版），2006，7（3）：229－231．
［23］ 刘向国，谢国明．短时间序列的心率变异性信号的关联维数计算［J］．现代临床医学生物工程学杂志，2001，7（6）：420－421．
［24］ 庞茂，吴瑞明，谢明祥．关联维数快速算法及其在机械故障诊断中的应用［J］．振动与冲击，2010，29（12）：106－109．
［25］ 李少华，董增川，董四方．水资源复杂巨系统及其和谐性探析［J］．水利发展研究，2007，（7）：10－14．
［26］ 佟春生．复杂性理论在河川径流时间序列分析中的应用研究［D］．西安：西安理工大学，2005．
［27］ 张雨英．一种多尺度协同仿真方法及其在SOFC－MGT混合发电系统中的应用［D］．重庆：重庆大学，2009．
［28］ 李东涛．复杂性科学对中医药学研究方法的启示［J］．山东中医药大学学报，2010，34（4）：299－302．
［29］ 李伟．基于复杂性科学的企业专利能力影响因素分析［J］．系统科学学报，2010，18（3）：85－91．
［30］ 彭建，蔡运龙．复杂性科学视角下的土地利用/覆被变化［J］．地理与地理信息科学，2005，21（1）：100－103．
［31］ 焦晓佑．智能工程推理机制研究及其在电力供需平衡复杂性分析中的应用［D］．北京：北京交通大学，2010．
［32］ 曹一家，王光增．电力系统复杂性及其相关问题研究［J］．电力自动化设备，2010，30（2）：5－10．
［33］ 王连心．基于系统复杂性科学及其方法论的中医诊疗认知规律研究［D］．北京：北京中医药大学，2009．
［34］ Sabeti M，Katebi S，Boostani R. Entropy and complexity measures for EEG signal classification of schizophrenic and control participants［J］．Artificial Intelligence in Medicine，2009，47（3）：263－274．
［35］ 黄光晓．外汇市场复杂性及人工外汇市场研究［D］．厦门：厦门大学，2009．
［36］ Park J B，Lee J W，Yang J－S，et al. Complexity analysis of the stock market［J］．Physica A：Statistical Mechanics and its Applications，2007，379（1）：179－187．



[37] 周春燕．复杂性视阈中的高校教师绩效评价研究［D］．镇江：江苏大学，2009.
[38] Cooper H，Geyer R. Using 'complexity' for improving educational research in health care［J］. Social Science & Medicine，2008，67（1）：177－182.
[39] 李进．交通网络复杂性及其优化研究［D］．天津：天津大学，2009.
[40] Haynes K E，Kulkarni R，Stough R. Traffic Grammar and Algorithmic Complexity in Urban Freeway Flow Patterns［J］. Networks and Spatial Economics，2007，7（4）：333－351.
[41] 干飞．矿产资源消耗演化复杂性模型及应用研究［D］．北京：中国地质大学（北京），2008.
[42] Munroe D K，Southworth J，Tucker C M. The dynamics of land－cover change in western Honduras：exploring spatial and temporal complexity［J］. Agricultural Economics，2002，27（3）：355－369.
[43] 徐敏．基于复杂性理论的河湖环境系统模型研究［D］．长沙：湖南大学，2007.
[44] 徐敏．基于资源环境系统复杂性研究的城市环境规划理论与方法［D］．长沙：湖南大学，2004.
[45] 李树苗，杨绪松，靳小怡，等．中国乡城流动人口社会网络复杂性特征分析［J］．市场与人口分析，2006，12（5）：12，13－22.
[46] Parrott L. Quantifying the complexity of simulated spatiotemporal population dynamics［J］. Ecological Complexity，2005，2（2）：175－184.
[47] 金菊良，魏一鸣，丁晶，等．水资源系统工程的理论框架探讨［J］．系统工程理论与实践，2004，24（2）：130－137.
[48] 陈南祥，李跃鹏，张海丰．水资源系统动力学特征研究现状及进展［J］．人民黄河，2010，32（6）：46－47.
[49] 陈南祥．复杂系统水资源合理配置理论与实践——以南水北调中线工程河南受水区为例［D］．西安：西安理工大学，2006.
[50] 魏一鸣．洪水灾害空间分布的复杂性研究［J］．科技导报，1999，（6）：25－27.
[51] 尹义星，许有鹏，陈莹．基于复杂性测度的中国洪灾受灾面积变化研究［J］．地理科学，2008，28（2）：241－246.
[52] 李润明．牡丹江对俄经贸发展思路［J］．牡丹江大学学报，2010，19（6）：81－82，85.
[53] 刘兆丰，杨柏松，王艳丰．构建产地粮食安全保障体系 全面提升产地粮食烘储水平［J］．农业工程技术（农产品加工业），2010，（5）：34－36.
[54] 中华人民共和国国家发展和改革委员会．全国新增1000亿斤粮食生产能力规划（2009～2020年）[EB/OL].（2009－11－03）[2010－08－26]. http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/P020091103567866621892.pdf.
[55] 宋开山，刘殿伟，王宗明，等．三江平原过去50年耕地动态变化及其驱动力分析［J］．水土保持学报，2008，22（4）：75－81.
[56] 李士峰，崔广臣，杨国顺．三江平原洪涝灾害及治理措施［J］．水利水电科技进展，2000，20（1）：65－67.
[57] 刘殿伟，黄妮，王宗明，等．基于GIS的三江平原耕地适宜性评价研究［J］．农业系统科学与综合研究，2009，25（4）：414－422.
[58] 刘晓兰．三江平原水利规划环境资源承载力分析与评价［J］．环境科学与管理，2009，34（1）：145－148，151.
[59] 王立峰．三江平原发展灌溉和保护湿地工程建设的必要性［J］．现代化农业，2007（7）：21－22.
[60] 李云成，刘昌明，于静洁．三江平原湿地保护与耕地开垦冲突权衡［J］．北京林业大学学报，2006，28（1）：39－42.
[61] 韩贵清，禾云，邓保生，等．转变农业发展方式 保障国家粮食安全——关于黑龙江省加快发展现

代化大农业问题研究［J］．黑龙江农业科学，2011，(3)：1－5.
［62］ 刘志祥，郝庆菊，祝滔，等．三江平原旱田土壤甲烷氧化的初步研究［J］．西南大学学报（自然科学版），2011，33（1）：85－90.
［63］ 敖长林，李一军，冯磊，等．基于CVM的三江平原湿地非使用价值评价［J］．生态学报，2010，30（23）：6470－6477.
［64］ 王宗明，宋开山，刘殿伟，等．1954～2005年三江平原沼泽湿地农田化过程研究［J］．湿地科学，2009，7（3）：208－217.
［65］ 郝庆菊．三江平原沼泽土地利用变化对温室气体排放影响的研究［D］．北京：中国科学院研究生院（大气物理研究所），2005.
［66］ 王韶华，苏轶醒，刘昆鹏．三江平原水资源的合理开发利用［J］．中国农村水利水电，2005（7）：26－28.
［67］ 陶洁，张兴波．发展水稻生产是三江平原抗旱除涝的一项有效措施［J］．黑龙江水利科技，2010，38（3）：214－215.
［68］ 赵清，丁红，刘东．支持向量机在三江平原井灌水稻需水量预测中的应用［J］．水资源与水工程学报，2010，21（2）：72－74.
［69］ 王韶华，田园．三江平原地下水埋深变化及成因的初步分析［J］．灌溉排水学报，2003，22（2）：61－64.
［70］ 黄妮，刘殿伟，王宗明．1986～2005年三江平原水田与旱地的转化特征［J］．资源科学，2009，31（2）：324－329.
［71］ 苏艳华，张稳．三江平原近50年耕地面积动态变化序列重建［J］．地理与地理信息科学，2008，24（6）：72－75.
［72］ 沃晓岚，孙香泰，彭振．三江平原地区地下水资源开发利用状况及可持续利用对策［J］．黑龙江水利科技，2009，37（4）：45－46.
［73］ 新华社．国家粮食安全中长期规划纲要（2008～2020年）［EB/OL］．(2008－11－13)［2011－04－27］．http：//www.gov.cn/jrzg/2008－11/13/content_1148414.htm.
［74］ 王健．火灾系统时空分布规律及相关性分析［D］．合肥：中国科学技术大学，2009.
［75］ 王文圣，黄伟军，丁晶．基于小波消噪和符号动力学的径流变化复杂性研究［J］．水科学进展，2005，16（3）：380－383.
［76］ 蒋艳，夏军．塔里木河流域径流变化特征及其对气候变化的响应［J］．资源科学，2007，29（3）：45－52.
［77］ 李贤彬，丁晶，李后强．水文时间序列的子波分析法［J］．水科学进展，1999，10（2）：144－149.
［78］ 李贤彬，丁晶，李后强．水文序列Hurst系数的子波估计［J］．水利学报，1999，30（8）：21－25.
［79］ 张少文，王文圣，丁晶，等．分形理论在水文水资源中的应用［J］．水科学进展，2005，16（1）：141－146.
［80］ 王文圣，向红莲，赵东．水文序列分形维数估计的小波方法［J］．四川大学学报（工程科学版），2005，37（1）：1－4.
［81］ 王文圣，向红莲，黄伟军，等．基于连续小波变换的径流分维研究［J］．水利学报，2005，36（5）：598－601.
［82］ 余姝萍，刘国东，吴媛，等．岷江上游日径流过程分维分析及其生态脆弱性表征［J］．西南民族大学学报·自然科学版，2005，31（1）：79－84.
［83］ 刘起方，马光文，刘群英，等．基于分形插值理论的径流预测探讨［J］．水力发电学报，2008，27（4）：20－25.



[84] 佟春生，黄强，刘涵，等．基于近似熵的径流序列复杂性研究［J］．西北农林科技大学学报（自然科学版），2005，33（6）：121－126.
[85] 佟春生，黄强，刘涵．复杂性诊断方法及其在水资源系统中的应用［J］．系统仿真学报，2005，17（11）：2649－2651，2669.
[86] 佟春生，黄强，刘俊萍，等．基于复杂性理论的黄河河川径流序列诊断分析［J］．系统工程学报，2005，20（6）：559－563.
[87] 邓自旺，闵锦忠，张勇．中国近50年气候变化复杂性分析［J］．南京气象学院学报，2001，24（2）：186－193.
[88] 郝成元，吴绍洪，李双成．排列熵应用于气候复杂性度量［J］．地理研究，2007，26（1）：46－52.
[89] 李双成，刘逢媛，赵志强．中国气候系统复杂性及其地域差异［J］．气候与环境研究，2008，13（1）：31－38.
[90] 彭涛，陈晓宏，庄承彬．基于样本熵的东江月径流序列复杂性分析［J］．生态环境学报，2009，18（4）：1379－1382.
[91] 魏一鸣，孙国栋，胡平昭，等．九江年降水时间序列的混沌特性［J］．江西科学，1998，16（3）：141－145.
[92] 杨思全，陈亚宁．河冰湖突发洪水的分形和混沌特征研究［J］．干旱区地理，1999，22（2）：77－82.
[93] 陈云浩，史培军，李晓兵．不同热力背景对城市降雨的影响（Ⅱ）——降雨时序的混沌分析［J］. 自然灾害学报，2001，10（3）：20－25.
[94] 柳景青．用水量时间观测序列中的分形和混沌特性［J］．浙江大学学报（理学版），2004，31（2）：236－240.
[95] 李国良，付强，冯艳，等．基于混沌的三江平原月降水时间序列分析［J］．数学的实践与认识，2007，37（6）：76－81.
[96] 金云翔，余华，刘鹏．月降水序列混沌特性识别及预测［J］．水电能源科学，2008，26（5）：9，10－12.
[97] 陈引锋，方迎辉，朱巧英．黑河日径流量混沌变化特性研究［J］．地下水，2010，32（3）：121－123.
[98] 武荣，陈高锋，郭旭新．昕水河月径流量混沌特性分析［J］．人民黄河，2010，32（7）：33－35.
[99] 邹文安，刘立博，王凤．人工神经网络BP模型在枯季径流量预测中的应用［J］．水资源研究，2008，29（3）：43－45，48.
[100] 赵瑜，辛芳芳，梁川．基于BP网络模型的大桥水库入库径流预测［J］．四川水利，2009（3）：16－18.
[101] 王其虎，钱新，张玉超，等．BP神经网络在流溪河水库径流量预测中的应用［J］．环境保护科学，2010，36（3）：19－21，49.
[102] 于国荣，夏自强．混沌时间序列支持向量机模型及其在径流预测中应用［J］．水科学进展，2008，19（1）：116－122.
[103] 郭晓亮，王国利，梁国华，等．径流混沌时间序列的模糊支持向量机预测模型研究及其应用［J]. 水力发电学报，2010，29（3）：51－55.
[104] 师彪，李郁侠，于新花，等．动态调整粒子群—霍尔特模型在径流预测中的应用［J］．农业工程学报，2010，26（7）：8－13.
[105] 付强，刘建禹，王立昆，等．基于人工神经网络的井灌水稻区地下水位预测［J］．东北农业大学学报，2002，33（2）：152－159.



[106] 付强，门宝辉，王志良，等．非平稳时序模型在三江平原井灌水稻区地下水动态变化中的应用 [J]．系统工程理论与实践，2003，23（1）：132－138.

[107] 付强，李国良．三江平原地下水埋深时间序列的混沌研究 [J]．水土保持研究，2008，15（3）：31－34.

[108] 刘东，马永胜，付强．三江平原井灌水稻区地下水动态变化规律研究 [J]．灌溉排水学报，2006，25（5）：42－46.

[109] 刘东，付强．三江平原井灌水稻区地下水动态变化规律的小波神经网络分析 [J]．灌溉排水学报，2008，27（3）：86－89.

[110] 刘东，付强．小波随机耦合模型在三江平原井灌区地下水位预测中的应用 [J]．数学的实践与认识，2008，38（16）：54－62.

[111] 刘东，付强．小波最近邻抽样回归耦合模型在三江平原年降水预测中的应用 [J]．灌溉排水学报，2007，26（4）：82－85.

[112] 刘东，付强．基于小波随机耦合模型的三江平原年降水量预测 [J]．数学的实践与认识，2008，38（1）：97－104.

[113] 刘东，赵清，付强．基于小波消噪的三江平原井灌区年降水随机预测模型 [J]．中国农村水利水电，2010（4）：4－7.

[114] 刘东，付强．基于小波消噪的三江平原低湿地月降水时间序列分析 [J]．水土保持研究，2008，15（2）：164－167，172.

[115] 刘东，付强．基于小波变换的三江平原低湿地井灌区年降水序列变化趋势分析 [J]．地理科学，2008，28（3）：380－384.

[116] 刘东，付强．基于小波变换的三江平原井灌区主汛期降水序列多时间尺度分析 [J]．水土保持研究，2008，15（6）：42－45.

[117] 李明皓，王秋萍．乌云河东风站年平均径流量的多时间尺度分析 [J]．林业科技情报，2009，41（4）：127－129.

[118] 孟凡香，徐淑琴，李天霄，等．基于离散小波变换的水稻生育期降水量多时间尺度特征分析 [J]. 黑龙江水专学报，2010，37（1）：104－106.

[119] 邵年华，沈冰，秦胜英，等．核主成分支持向量机模型在蒸发预测中的应用 [J]．北京师范大学学报（自然科学版），2010，46（3）：307－310.

[120] 魏光辉，董新光，杨鹏年，等．基于灰色关联分析与多元线性回归模型的水面蒸发预测 [J]．节水灌溉，2010（2）：41－44.

[121] 买买提·阿布都拉，玉苏甫·阿布都拉，刘海涛，等．和田市近40年蒸发量的变化特征 [J]．气象，2006，32（8）：92－96.

[122] 赵恒和，郭连云，许乃伦，等．共和盆地近40年蒸发量的变化特征 [J]．青海科技，2007，（6）：23－26

[123] 杨保华，李靖，樊毅，等．云南干热河谷蒸发量的小波多时间尺度分析 [J]．云南农业大学学报，2008，23（5）：678－682，692.

[124] Hense A. On the possible existence of a strange attractor for the southern oscillation [J]. Biter Phys Atoms，1987，60（1）：34－47.

[125] 黄国如，芮孝芳．流域降雨径流时间序列的混沌识别及其预测研究进展 [J]．水科学进展，2004，15（2）：255－260.

[126] Jayawardena A W，Lai F Z. Analysis and prediction of chaos in rainfall and stream flow time series [J]. Journal of Hydrology，1994，153（1－4）：23－52.

[127] Puente C E，Obregón N. A deterministic geometric representation of temporal rainfall：results for a storm in Boston [J]. Water Resources Research，1996，32（9）：2825－2839.



[128] Porporato A, Ridolfi L. Nonlinear analysis of river flow time sequences [J]. Water Resources Research, 1997, 33 (6): 1353 - 1367.

[129] Sivakumar B, Liong S Y, Liaw C Y. Evidence of chaotic behavior in Singapore rainfall [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34 (2): 301 - 310.

[130] Sivakumar B, Liong S Y, Liaw C Y, et al. Singapore rainfall behavior: chaotic? [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1999, 4 (1): 38 - 48.

[131] Sivakumar B, Sorooshian S, Gupta H V, et al. A chaotic approach to rainfall disaggregation [J]. Water Resources Research, 2001, 37 (1): 61 - 72.

[132] Gaume E, Sivakumar B, Kolasinski M, et al. Identification of chaos in rainfall temporal disaggregation: Application of the correlation dimension method to 5 - minute point rainfall series measured with a tipping bucket and an optical raingage [J]. Journal of Hydrology, 2006, 328 (1 - 2): 56 - 64.

[133] Ng W W, Panu U S, Lennox W C. Chaos based Analytical techniques for daily extreme hydrological observations [J]. Journal of Hydrology, 2007, 342 (1 - 2): 17 - 41.

[134] Millán H, Kalauzi A, Llerena G, et al. Meteorological complexity in the Amazonian area of Ecuador: An approach based on dynamical system theory [J]. Ecological Complexity, 2009, 6 (3): 278 - 285.

[135] TRIPATHI M P, PANDA R K, PRADHAN S, et al. Runoff Modelling of a Small Watershed Using Satellite Data and GIS [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2002, 30 (1 - 2): 39 - 52.

[136] Méndez M C, Manteiga W G, Bande M F, et al. Modelling of the monthly and daily behaviour of the runoff of the Xallas river using Box - Jenkins and neural networks methods [J]. Journal of Hydrology, 2004, 296 (1 - 4): 38 - 58.

[137] Trivedi H V, Singh J K. Application of Grey System Theory in the Development of a Runoff Prediction Model [J]. Biosystems Engineering, 2005, 92 (4): 521 - 526.

[138] Nagler T, Rott H, Malcher P, et al. Assimilation of meteorological and remote sensing data for snowmelt runoff forecasting [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112 (4): 1408 - 1420.

[139] Patil J P, Sarangi A, Singh O P, et al. Development of a GIS Interface for Estimation of Runoff from Watersheds [J]. Water Resour Manage, 2008, 22 (9): 1221 - 1239.

[140] Remesan R, Shamim M A, Han D, et al. Runoff prediction using an integrated hybrid modelling scheme [J]. Journal of Hydrology, 2009, 372 (1 - 4): 48 - 60.

[141] Daliakopoulos I N, Coulibaly P, Tsanis I K. Groundwater level forecasting using artificial neural networks [J]. Journal of Hydrology, 2005, 309 (1 - 4): 229 - 240.

[142] Nayak P C, Satyaji Rao Y R, Sudheer K P. Groundwater Level Forecasting in a Shallow Aquifer Using Artificial Neural Network Approach [J]. Water Resources Management, 2006, 20 (1): 77 - 90.

[143] Banerjee P, Prasad R K, Singh V S. Forecasting of groundwater level in hard rock region using artificial neural network [J]. Environmental Geology, 2009, 58 (6): 1239 - 1246.

[144] Mohanty S, Jha M K, Kumar A, et al. Artificial Neural Network Modeling for Groundwater Level Forecasting in a River Island of Eastern India [J]. Water Resour Manage, 2010, 24 (9): 1845 - 1865.

[145] Chen Z H, Grasby S E, Osadetz K G. Predicting average annual groundwater levels from climatic variables: an empirical model [J]. Journal of Hydrology, 2002, 260 (1 - 4): 102 - 117.

[146] Moukana J A, Koike K. Geostatistical model for correlating declining groundwater levels with

changes in land cover detected from analyses of satellite images [J]. Computers & Geosciences, 2008, 34 (11): 1527 - 1540.

[147] Valverde Ramírez M C, De Campos Velho H F, Ferreira N J. Artificial neural network technique for rainfall forecasting applied to the São Paulo region [J]. Journal of Hydrology, 2005, 301 (1 - 4): 146 - 162.

[148] Salman A, Al - Shammiri M A. New Computational Intelligence model for predicting evaporation rates for saline water [J]. Desalination, 2007, 214 (1 - 3): 273 - 286.

[149] Andreo B, Jiménez P, Durán J J, et al. Climatic and hydrological variations during the last 117 - 166 years in the south of the Iberian Peninsula, from spectral and correlation analyses and continuous wavelet analyses [J]. Journal of Hydrology, 2006, 324 (1 - 4): 24 - 39.

[150] 冯国章，宋松柏，李佩成．水文系统复杂性的统计测度 [J]. 水利学报，1998，29 (11): 76 - 81.

[151] 陈崇德，牛爱军．R/S分析在水库年来水趋势预测中的应用 [J]. 水资源与水工程学报，2010，21 (3): 174 - 176.

[152] 张人权，梁杏，靳孟贵，等．当代水文地质学发展趋势与对策 [J]. 水文地质工程地质，2005 (1): 51 - 56.

[153] 钱永．开采条件下华北平原浅层地下水系统演变研究 [D]. 北京：中国地质科学院，2007.

第二章 研究区域基本情况

黑龙江省农垦总局建三江分局（以下简称建三江分局）位于富锦、同江、抚远、饶河两市两县交界处的三江平原腹地，地处北纬 46°49′42″～48°13′58″，东经 132°31′26″～134°22′26″，辖区总面积 1.23 万 km^2[1]，其中耕地面积 68.2 万 hm^2[2]。建三江分局下辖15个大中型国有农场，设有七星农场全国农垦现代农业示范区[3]、洪河国家级自然保护区以及多个省级、分局级自然保护区[4]，2003 年，建三江分局通过了国家环保总局组织的“国家级生态示范局”验收[5]。建三江分局水资源丰富、气候温和湿润、土地集中连片、地势平坦、土质肥沃，适宜种植水稻、玉米、小麦、大豆等作物[6]。建三江分局是“中国绿色水稻之乡”，2006 年，被国家粮食协会授予“中国绿色米都”称号。建三江分局农业机械化程度达到 96%，人均年生产粮食能力为 4.6 万 kg，多年来，为保障国家粮食安全做出了重要贡献。2008 年，建三江分局粮食总产量达 46.5 亿 kg，占黑龙江垦区的 1/3，占全省的 1/10；商品粮总量为 42.5 亿 kg，占全省的 1/6[7]，商品粮率高达 91.4%。因此，建三江分局在黑龙江省“千亿斤粮食产能工程”战略布局中占有举足轻重的地位。

第一节 地形、地貌

建三江分局在黑龙江、松花江、乌苏里江三江汇流的河间地带，全局地势西南高、东北低，除少数山丘外，绝大部分是平原沼泽地带。现有山地面积 443km^2，占总面积的 4%；丘岗山坡地面积 420km^2，占总面积的 3.4%；其余为低平原沼泽区，面积 11291km^2，占总面积的 92.6%。

北部和东南部有部分山地，呈东北至西南走向，断续不连，达黑龙江、乌苏里江两江汇合口，海拔在 100～626.6m 之间，主要分布在勤得利、八五九、胜利三个农场，都属完达山余脉。最高点是勤得利的额图山、勤得利山。

中部为黑龙江、松花江、乌苏里江及其主要支流挠力河所形成的大面积冲积平原。河流上游为湿地，无明显河槽，形成了大面积的积水重湿地和漂筏苔草；到了中下游，方有弯曲迂回的河道，两岸有明显的河床和十分宽阔的漫滩。冲积平原平均海拔 54m 左右（最低 40m、最高 60m）。平原区地形坡降平缓，一般在 1/5000～1/12000，微地形变化复杂，碟形、线形洼地星罗棋布，泡沼水线大量存在。在乌苏里江、黑龙江主航道左侧，有18个江岛在八五九农场、勤得利农场区域内。

第二节 气 象

建三江分局属于寒温带湿润季风气候区，冬季漫长，寒冷干燥，常受西伯利亚、贝加

尔湖和蒙古高原的寒流影响，夏季短促，温热湿润。受海洋暖湿气候影响，春季多大风而少雨，秋季多暴雨，亦有阴雨连绵之时，春秋气温变化剧烈。全年日照时间长，无霜期短，但光能、热量、水分三大气候资源均能满足一年一熟的农作物生长。

全区年平均气温 1.0～2.0℃，极端最高气温 38℃，极端最低气温零下 41.6℃。1 月平均气温－20～23.8℃，7 月平均气温 21.1～22.8℃，日平均温度大于 10℃的活动积温为 2267～2415℃[8]。

全年降雨量为 383.5～886.1mm，多集中在 7～9 月，占全年降雨量的 50%～70%，年最大日暴雨为 106.8mm，暴雨多集中在夏季，多年平均降雨量为 545.4mm，降雨期多在 7 月以后，但实际变幅较大，且年内降雨分配极不平衡，年平均降雨天数为 105d，多则 126d，少则 84d，降水不均是产生春旱、秋涝的重要原因[8]。

全年日照时数 2260～2429h，日照率为 55%。多年平均蒸发量为 1203mm。无霜期短，为 120～141d，平均初霜期在 9 月 20 日左右，平均终霜期在 5 月 18 日左右。最大冻深 2.1m。全年月平均地面温度为－20.9～26.2℃。冬季多西北风，夏季多东南风和东北风，风力达 4～7 级，平均风速为 4.4m/s。年平均相对湿度为 69%，夏季湿度最大，在 80%左右[8]。多年平均因素气象因素变化见表 2－1。

表 2－1　　多年平均气象因素变化一览表

分局名称	相对湿度 (%)	日照时数 (h)	平均风速 (m/s)	总云量 (成)	降水量 (mm)	E_{601}蒸发皿 (mm)
建三江分局	69	2272.8	4.4	5.3	545.4	1203.2

第三节　水　文　地　质

一、河流特性

建三江分局有“三江”、“六河”、“九支流”之称。“三江”是松花江、黑龙江、乌苏里江，其中黑龙江、乌苏里江属于边界线上的国际河流。“六河”有别拉洪河、浓江河、鸭绿河、挠力河、七星河、青龙莲花河，这些河流皆为平原沼泽性河流。上游为轻重湿地，无明显河槽；中游水线蜿蜒形成沼泽性河道，杂草丛生，皆为宽阔的大水线；下游地形比降稍陡，河床断面窄小且弯曲，水量集中，冲成明显河身，汛期往往受洪水顶托，易成涝灾。“九支流”有沃绿兰河、瓦其卡河、别拉音河、阿加拉河、卧牛河、八岔河、二道河、喜春河、阿布胶河、乌拉草河、大兴河、勤得利河、二吉力河等。上述河流多是西南流向东北，分别流入黑龙江和乌苏里江。

黑龙江发源于大兴安岭西侧，干流全长超过 4000km，流域面积 180 万 km²，河道坡降 1/5000～1/19000。黑河以上为上游，自黑河至乌苏里江口为中游，以下至鄂霍次海为下游，纳乌苏里江后，流入俄罗斯境内，为中、俄界河。

乌苏里江为黑龙江支流，中、俄界河，发源于完达山和锡霍特岭之间的纵谷内，由南向北至伯力附近注入黑龙江，总流域面积为 18.7 万 km²，在我国境内 5.6 万 km²，河流

长度 905km，河道坡降 1/1600～1/48000。

别拉洪河发源于富锦市东面石砬子山西之平原区，由西南向东北汇入乌苏里江。河流全长 170km，地面比降为 1/7500～1/12000，流域面积 4340km²。蜿蜒曲折，上中游自西向东，下游由西南向东北流入乌苏里江，除局部残丘外，绝大部分均为平原低地，约 4359km²，占流域面积的 96.8%。

浓江河发源于青龙山农场 16 队东南部和勤得利农场四分场 47 队、33 队、37 队以西的重沼泽地，流域总面积为 2630km²，其中山区 55km²、平原 2575km²，河流长度 199km，河道坡降 1/8000～1/12000，至抚远流入黑龙江。

鸭绿河发源于额图山和街津山之间水线汇流入鸭绿河。流域总面积 1336km²，其中丘陵 4km²，平原 1332km²，河流长度 194km，河道坡降 1/3000～1/10000。

挠力河流域面积 23589km²，河流长度 596km，河道坡降 1/200～1/1000，注入乌苏里江。

七星河是挠力河最大支流，发源于富锦市锅盔山南部，河流长度 175km，流域面积 6520km²，平槽时水面比降为 1/26000～1/36000。

青龙莲花河发源于富锦市东部和青龙山农场 17 队西南沼泽地，经青龙山 14 队西北汇入莲花河后，注入黑龙江。河流全长 52km（均在青龙山农场），流域面积 1041km²，水源为降雨径流。

全局地表水资源总量为 2854.3846 亿 m³，其中当地产水量为 10.736 亿 m³，径流面积为 12154km²，多年平均值年径流水深 3413.8mm。分局内各农场年径流量见表 2－2。

表 2－2　　建三江分局各农场地表径流量特征值表

场 别	面 积 (km²)	多年平均年径流量 (亿 m³)	各种保证率年径流量（亿 m³）			
			50%	75%	80%	95%
大兴	825.4	0.5860	0.4061	0.1684	0.1304	0.0299
七星	1195.4	0.7985	0.4758	0.1577	0.1134	0.0165
创业	533.8	0.3891	0.2413	0.0843	0.0619	0.0101
青龙山	548.8	0.4374	0.2761	0.0993	0.0735	0.0127
前进	765.8	0.5813	0.3500	0.1171	0.0850	0.0326
红卫	626.5	0.5351	0.3860	0.1698	0.1341	0.0353
洪河	664.4	0.5560	0.3794	0.1502	0.1143	0.0239
胜利	905.0	0.8869	0.6888	0.3439	0.2842	0.0941
前锋	1110.1	1.0524	0.7538	0.3275	0.2575	0.0674
八五九	1355.8	1.2961	1.0006	0.4949	0.4054	0.1322
二道河	532.2	0.5184	0.3874	0.1810	0.1458	0.0425
前哨	687.3	0.7258	0.5388	0.2481	0.1986	0.0552
勤得利	1872.4	1.8462	1.2171	0.4681	0.3539	0.0702
鸭绿河	513.1	0.5177	0.3473	0.1370	0.1047	0.0219
合计	12136	10.7269	7.4485	3.1473	2.4627	0.6445

受大陆性季风气候影响，局内水源具有降雨、融雪两种类型，以降雨为主。在水情上，每年可分为春汛、夏季平枯水、雨洪和冬季枯水四个时期，雨洪峰高、量大，冬季枯水历时最长。

二、地下水资源

本地区地质构造属中生代合江内陆断陷的次级单元——抚远凹陷的中部。第四纪以来，由于新构造运动，除局部上升外，多数地区长期缓慢下降，积累了很厚的三江冲积物。其特点是：上部覆盖着黏土和亚黏土，下层为砂砾石层。黏土、亚黏土覆盖层厚度一般为 3～17m，质地黏重密实。小于 0.005mm 黏粒占 20%～58%。干容重 1.61～1.66g/cm^3，基本不透水，形成了天然的隔水层，造成了地下水和地表水无力联系。黏土覆盖层以下由中细沙组成，其厚度不等，一般 3～8m。再下层为 40～180m 厚的砂砾石层，含水丰富，单位涌水量 20～70t/(h·m)，单井涌水量（当 ϕ200mm，降深 5m 时）1000～9000t/d。地下水的物理性质较好，无色、无臭、透明，水化学类型属重碳酸钙钠型水，矿化度一般 0.15～0.3g/L，水温 4～5℃，适用于饮用和农田灌溉[8]。

由于生活、工业用水量的相对较少，地下水资源的丰枯表现不明显，但由于近几年来，水稻种植迅速发展，地下水资源的开发利用程度高，集中开采时开采量大，造成了暂时性降落漏斗，水位变幅较大，主要体现在 5～8 月地下水进入枯水期，导致个别农场农用水田井抽不上水，进入 8 月下旬后水稻停灌，水位逐渐恢复。

根据 1998 年黑龙江农垦勘测设计研究院对建三江分局第四系浅层地下水资源调查与评价报告中给出的资料，建三江分局地下水资源总量为 14.84 亿 m^3/a，可开采量为 13.35 亿 m^3/a (90%)。

第四节 土　　壤

建三江分局地表土壤共分为五大土类，即棕壤土、白浆土、草甸土、沼泽土和泛滥地土壤，其中：白浆土和沼泽土占 84%。

(1) 棕壤土：包括山地棕壤和砂质棕壤，面积为 98.67km^2，仅占总面积的 2%。主要分布在别拉洪河中游南部山区和二道河北部岗平地上。其特点是质地轻，黑土层薄，有机质和养分含量少，排水条件好。主要植被是乔木林，覆盖度达 50%～80%，一般高度 10～15m。

(2) 白浆土：包括岗地白浆土、低地白浆土、平地白浆土三类。面积为 2653.33 km^2，占总面积的 59%，是本流域最主要的土壤。白浆土的黑土层肥力较高，白浆层贫瘠且淀积层坚硬。白浆土的好坏因其黑土层厚度而异，局内白浆土的黑土层厚度一般为 10～20cm。

(3) 草甸土：面积有 240km^2，占总面积的 5%。主要分布在下游两岸平地上。黑土层厚 30cm 左右。土壤肥沃，有机质含量达 5%～10%，有较好的团粒结构，但土质多属黏重，易发生黏朽冷浆、雨水集中时有内涝威胁。主要植被为小叶樟等。

(4) 沼泽土：包括草甸沼泽土和腐泥沼泽土两类，分布在整个流域蝶形、线形洼地



上。沼泽土表层有厚度不等的泥炭层，下部为腐泥层或潜育层，季节性积水或常年积水。分布面积较大，约 1100km²，占总面积的 25%。

(5) 泛滥地土壤：分布在别拉洪河滩地上河流两岸，间歇性受河流泛滥影响，包括泛滥地草甸地和泛滥地沼泽土。面积 413.33km²，占总面积的 9%。

第五节　社会经济及农业生产

建三江分局现有人口 20 万人，人均占有耕地 3.33hm²，居全国首位。各类从业人员 82577 人，有各类家庭农场 48895 户。非地经营收入 1 亿元，人均纯收入 17000 元以上，低收入群体人均收入达到 8000 元以上。2010 年完成粮食播种面积 70.93 万 hm²，实现粮食总产 60 亿 kg，平均单产 504kg，经济发展速度 16%[9]。开发建设以来，全分局累计生产粮食 500 亿 kg，为国家提供优质商品粮 450 亿 kg。2007～2009 年，连续 3 年被农业部授予"全国粮食生产先进地县（农场）"荣誉称号；被全国绿化委员会授予"全国造林绿化模范先进单位"荣誉称号。

建三江分局辖区内的 15 个农场，主要种植的作物种类为水稻、小麦、玉米、大豆、杂豆等。种植面积分别为水稻 48.69 万 hm²，大豆 9.94 万 hm²，玉米 7.49 万 hm²，小麦 2.64 万 hm²、杂豆 0.71 万 hm²。种植比例分别为水稻 70.0%、大豆 14.3%、玉米 10.7%、小麦 3.8%、杂豆 1.2%，单产分别为水稻 595kg、大豆 158kg、玉米 514kg、小麦 350kg、杂豆 155kg。总产分别为水稻 43.45 亿 kg、大豆 2.36 亿 kg、玉米 5.77 亿 kg、小麦 1.39 亿 kg、杂豆 0.17 亿 kg[8]。各农场在建三江分局的统一管理下，水稻采用连作，而旱田作物以麦、豆、杂的轮作方式为主。

建三江分局的各项事业全面发展。教学条件不断改善，拥有成人中等专业学校 1 所，普通高中 2 所，九年一贯制学校 15 所，小学 2 所，拥有教师 2975 人，在校学生 34131 人，教学质量不断提高，初升高入学率达 90%，高考升学率二本以上达到当年总人口的 3.6‰，小学辍学率为 0，初中辍学率降低到 2%以下。医疗卫生基础设施不断加强，医疗保健条件不断改善，全局拥有建筑面积 42000m²、医疗设备具备世界领先水平的中心医院 1 所，农场医院 15 所，人口自然增长率 2.6‰以内。交通通信事业不断发展，现有公路里程 3300km，电话总装机容量 58600 部，居民电话普及率达 95%，户均电脑入户率 35%以上。居民储蓄达到 18.2 亿元，人均储蓄 9100 元[9]。局直地区被评为"全国小城镇建设示范镇"。

建三江分局的农业科技水平逐渐处于领先地位。建成了 16 个开放式、花园式的农业科技示范园区，引进 6 大作物新品种 70 多个，各类新技术 30 余项，各种栽培措施 26 项，植保试验 35 项。建成科技示范带 900km，带动辐射面积 2281.33km²。科技贡献率和科技成果转化率分别达到 73%、85%，高于全国平均值 15 个百分点[9]。

近年建三江分局充分利用地理环境优势，建成了乌苏里江八五九灌区渠首和主灌渠工程，2010 年将灌溉水田 66.67km²。黑龙江勤得利灌区立项已经批复，并计划新建黑龙江青龙山灌区和前哨灌区，这四大提江水灌溉工程竣工后，总灌溉能力将达到 4766.67km²，可增产粮食 8 亿 kg[9]。这些灌溉工程，既可有效利用江水灌溉水田，提高大米品质及出米率，使三江大米外形美、品质好、营养物质多，又能有效解决湿地补水及补给平衡地下

水等问题，实现可持续发展。

第六节　建三江分局水资源开发利用中存在的问题

一、水资源开发利用不平衡

建三江分局是我国绿色水稻生产基地，早在20世纪60年代就开始试种水稻。1966年，建三江分局水田面积为5.33hm²，此后，水田面积逐年增长。特别是从1997年开始，建三江分局水田面积开始迅猛增加，2009年，水田面积达到491426.67hm²，相当于1966年的92200倍。建三江分局由于缺乏水资源控制性工程，地表水利用率较低，因此，当地农民主要依靠打井开采地下水来灌溉水田。对建三江分局近几年来的机电井数量进行统计，见表2-3。

表2-3　　建三江分局机电井数量变化情况

年　份	2006	2007	2008	2009
机电井数量（眼）	15230	18797	19328	21172
时段	2006～2007年	2007～2008年	2008～2009年	2006～2009年
机电井数量变化率（%）	23.4	2.8	9.5	13.0

随着井灌水田面积的增加，导致建三江分局地下水位普遍下降，地下水供需矛盾日益突出。据统计，1996～2002年，建三江分局地下水累计降深为2m左右。若仍然采用过去的地下水开采模式，建三江分局的地下水位将会持续下降，很有可能会导致“吊泵”、局部超采现象的发生，严重威胁当地的工农业生产及人畜用水安全。与此同时，建三江分局四大临江灌区建设进度缓慢，目前，实际灌溉面积仅为1万hm²，到2009年底，全局工程供水能力仅为2.67万hm²[10]。目前，建三江分局当地产地表水利用率仅为16%左右[11]，而过境水利用率更是不足0.04%，致使丰富的地表水资源白白浪费，地表水、地下水开发利用严重失衡。

二、水资源调控能力不足

长期以来，建三江分局虽然一直在探索有限水资源可持续利用与优化调控模式，但由于缺少科技支撑，尚未建立“涝水旱用、闲水忙用、以丰补歉”等水资源调控技术体系，特别是尚未建立有效的雨洪资源利用技术体系，致使水资源调控能力不足，尚未形成区域间、季节间、年季间的调水、补水格局。

三、水资源浪费严重

田间节水（特别是水田节水）是农业节水的重要途径。建三江分局虽然设有零星的水田节水示范区，但水田节水灌溉技术推广力度不大，同时由于国家政策及田间量水设施不配套，水费征收一直沿用“按亩收费”方式，水费价格杠杆作用未能得到充分发挥，致使当地农民水商品意识淡薄，长期以来，水田灌溉一直以大水漫灌（淹灌）方式为主，造成



了水资源的严重浪费。

四、抵御旱涝灾害能力较弱

建三江分局的排涝配套工程一直采用较低的“干三支五”的除涝标准[10]，一旦遇到超标准的丰水年，很容易产生内涝。由于水利投入不足，建三江分局排涝工程不配套，现有工程老化失修，效益降低，同时，缺少旱涝兼治的控制性工程[12]，导致农田抵御旱涝灾能力不强，影响了当地粮食的稳产和增产。

五、水利信息化建设工作滞后

2011 年中央 1 号文件《中共中央国务院关于加快水利改革发展的决定》中明确提出要加强水文气象基础设施建设，着力增强重点地区、重要城市、地下水超采区水文测报能力[13]。而建三江分局虽然在全局布设了 60 余眼地下水长期观测井，但由于经费与专职技术人员的限制，观测人员基本以水稻户为主，观测精度没有保障[10]，水利信息化建设步伐相对迟缓，尚未建立完善的地下水位自动监测网络及地下水资源安全预警平台，难以实现地下水资源的科学管理。

参 考 文 献

[1] 郭雷，马克明，张易．三江平原建三江地区 30 年湿地景观退化评价［J］．生态学报，2009，29（6）：3126－3135．

[2] 赵清．基于灰色预测的建三江地区地下水变化趋势研究［J］．水资源与水工程学报，2009，20（5）：128－130，134．

[3] 聂录．黑龙江七星农场示范区里建起智能温室［N］．农民日报，2009－06－11（07）．

[4] 黑龙江省农垦总局建三江分局计财处．建三江农垦统计年鉴（2007）［R］．建三江分局：建三江分局计财处，2008．

[5] 刘成果．亘古北大荒 中华大粮仓——建三江回访印象［J］．黑龙江粮食，2009，（6）：13－15．

[6] 孟军，杨广林．黑龙江省建三江农场自然灾害变化预测模型的建立［J］．东北农业大学学报，2003，34（3）：330－333．

[7] 李维峰，刘丽．建三江分局加快现代农业建设步伐综述［J］．中国新技术新产品，2009（10）：218．

[8] 黑龙江省农垦总局建三江分局农田水利建设规划［R］．黑龙江省农垦勘测设计研究院，2010．

[9] 央视网食品频道．黑龙江省农垦总局建三江分局情况简介——2006 年被国家粮食协会授予“中国绿色米都”的称号［EB/OL］．（2010－05－20）［2011－07－04］．http：//sp.cctv.com/20100520/104273.shtml．

[10] 于军，赵清．破解瓶颈 加快现代水利建设 为经济社会可持续发展提供保障［J］．水利天地，2010（7）：20－23．

[11] 刘加海，马艳．破解水资源瓶颈 做足节水用水文章——建三江分局综合利用水资源科学节水用水纪实［N］．北大荒日报，2010－03－26（002）．

[12] 李相莉，韩金超，王士兰，等．建三江分局水利工程现状及主要问题分析［J］．现代化农业，2008（1）：17－18．

[13] 王锋．水文发展要力求突破［N］．中国水利报，2011－03－18（002）．

第三章　系统复杂性测度理论与方法

系统复杂性测度是定量描述系统复杂性的过程，一般包括系统分析与指标数据采集、可测度分析与测度方法选择、测度与评价几个步骤[1]。系统分析与指标数据采集就是在明确系统要素、目标、环境与边界、层次结构的基础上，依据客观、全面、科学及可量化原则，构建能够表达系统复杂性特征的指标体系，并进行全面的数据采集；可测度分析与测度方法选择就是了解各种可能复杂性测度算法适宜何种复杂性测度、数据阀值要求、能否实现可比化度量、算法优缺点及是否可以改进等，分析系统具有或可能具有何种复杂性、哪些（种）算法可以测度此种复杂性、现有数据是否满足算法阀值要求，最后判断出系统复杂性是否可测度及选用何种测度方法；测度与评价就是运用所选择的方法对指标体系进行测度，并对测度结果进行评价分析，包括所测度系统的复杂性程度、测度结果的物理意义与管理学启示及测度算法可靠性分析等。对农业水文系统复杂性测度过程进行概化，如图 3-1 所示。



图 3-1　农业水文系统复杂性测度过程

在上述农业水文系统复杂性测度过程中，复杂性测度算法是度量系统复杂性的核心。本章将详细介绍常用的系统复杂性测度理论与方法，包括熵理论、符号动力学、分形理论等。

第一节　基于小波变换的信息量系数

一、小波变换

1982 年，法国地球物理学家 Morlet 等在地震波研究中首次提出小波变换（Wavelet Transform，简称 WT）[2-4]。小波变换克服了 Fourier 变换只能以一种分辨率来观察信号、不适用于非平稳信号的不足，可以对非平稳信号进行多分辨分析，具有良好的时频局部化特征，被誉为"数学显微镜"[5,6-9]。因此，小波变换受到了国内外学者的青睐，被广泛应用于信号奇异性检测[4,7]、图像处理[2,8]、机械故障诊断[10]、参数识别[11]、气体传感器信号分析[12]、改善信号信噪比[13,14]、建筑结构健康诊断与质量控制[15,16]、气候诊断[17]、心



率变异性分析[18]、股市预测[19]及水文序列多时间尺度分析[20]等各种领域中。小波变换包括连续小波变换（Continue Wavelet Transform，简称 CWT）和离散小波变换（Discrete Wavelet Transform，简称 DWT）[5,12]。

二、快速小波变换算法

当对水文时间序列进行连续小波变换或离散小波变换时，所获得的小波变换系数信息冗余[21,22]，计算量较大。因此，在实际应用中，多采用快速小波变换（Fast Wavelet Transform，简称 FWT）算法来计算小波变换系数。经常采用的快速小波变换算法包括 Mallat 算法[23,24]和 A Trous 算法（也称多孔算法）[5,25,26]。本节介绍简单、快捷、计算量小的 A Trous 算法。

设对水文时间序列 $f(t)(t=1,2,\cdots,N)$ 进行小波分解，令 $C^0(t)=f(t)$，A Trous 算法的分解和重构过程如下：

$$\begin{cases} C^j(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h(k)C^{j-1}(t+2^j k) \\ W^j(t) = C^{j-1}(t) - C^j(t) \end{cases} \tag{3-1}$$

$$C^0(t) = C^J(t) + \sum_{j=1}^{J} W^j(t) \tag{3-2}$$

式中：$C^j(t)$、$W^j(t)$ 分别为尺度 j 下的尺度系数（背景信号）和小波系数（细节信号），($j=1, 2, \cdots, J$)；J 为尺度数，一般认为至多有 $\lg N$ [N 为序列 $f(t)$ 的长度] 个尺度；$h(k)$为离散低通滤波器，滤波器一般选用对称紧支撑三阶 B 样条，即 $h(k)$ = (1/16，1/4，3/8，1/4，1/16)。称 $\{W^1(t),W^2(t),\cdots,W^J(t),C^J(t)\}$ 为在尺度 J 下的小波变换序列。

三、能量概率分布

利用小波变换系数 $W_j(t)$ 可以求得水文时间序列 $f(t)$ 在各种尺度 j 下的能量 E_j[27]：

$$E_j = \sum_{t=1}^{n} W_j^2(t) \quad (j=1,2,\cdots,J) \tag{3-3}$$

则水文时间序列 $f(t)$ 的总能量为：

$$E = \sum_{j=1}^{J} E_j \tag{3-4}$$

水文时间序列 $f(t)$ 在各个尺度上的能量概率分布 P_j 为：

$$P_j = \frac{E_j}{E} \; (j=1,2,\cdots,J) \tag{3-5}$$

四、信息量系数

对于时间序列 $X=\{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$，由 $\frac{|x_j|^2}{\|x\|^2}$ 定义了序列 X 的能量概率分布。将能量概率分布的 Shanon 熵定义为信息量系数（Information Cost Function，简称

ICF)[27,28]，即：

$$ICF = -\sum_{j=1}^{J} P_j \lg P_j \tag{3-6}$$

信息量系数ICF计算出了与系统能量分布相应的信息，表征了被研究系统的复杂程度。水文序列越无序、越复杂，其ICF就越大；反之，能量分布集中于某一频带，水文序列有序性越强，复杂性越弱，序列ICF越小。

第二节　近　似　熵

由Pincus于1991年提出的近似熵[29]（Approximate Entropy，简称ApEn）是一种非线性动力学方法[30]，它具有所需数据短、抗噪抗干扰能力强且确定或随机信号都可以使用等优点[31,30-35]，已经广泛用于气象学[32]、交通[33]、医学[34-37]及机械健康诊断[30,38,39]等领域中，而将其应用于地下水埋深序列复杂性研究的较少。

近似熵是用一个非负数来表示一个时间序列的复杂性，ApEn值越大，表明时间序列越复杂。近似熵的具体算法如下[31,29-39]：

设某水文时间序列数据为$x(1)$，$x(2)$，…，$x(n)$，共n个数据。

（1）按序号连续顺序组成一组m维矢量：

$$X(i)=[x(i),x(i+1),\cdots,x(i+m-1)] \quad (i=1\sim n-m+1) \tag{3-7}$$

（2）计算矢量$X(i)$与$X(j)$的距离。定义$X(i)$与$X(j)$的距离$d[X(i),X(j)]$为二者对应元素中差值最大的一个，即：

$$d[X(i),X(j)]=\max_{k=0\sim m-1}[|X(i+k)-X(j+k)|] \tag{3-8}$$

对于每一个i值，计算$X(i)$与其余矢量$X(j)$（$j=1\sim n-m+1$，但$j\neq i$）的距离$d[X(i),X(j)]$。

（3）给定阈值r，对于每一个i值，统计$d[X(i),X(j)]$小于r的数目及此数目与距离总数$n-m$的比值，记为$C_i^m(r)$，即：

$$C_i^m(r)=\frac{1}{n-m}\{d[X(i),X(j)]<r\text{的数目}\} \quad (i=1\sim n-m+1) \tag{3-9}$$

（4）对于所有的i，求其$C_i^m(r)$的自然对数，然后计算平均值，记为$\phi^m(r)$，即：

$$\phi^m(r)=\frac{1}{n-m+1}\sum_{i=1}^{n-m+1}\ln C_i^m(r) \tag{3-10}$$

（5）将维数增加1，变为$m+1$，重复步骤（1）～（4），得到$C_i^{m+1}(r)$和$\phi^{m+1}(r)$。

（6）理论上此序列的近似熵为：

$$ApEn(m,r)=\lim_{n\to\infty}[\phi^m(r)-\phi^{m+1}(r)] \tag{3-11}$$

一般来说，该极限以概率1存在。实际水文时间序列长度n不可能为∞。当n为有限值时按上述步骤得出的是序列$ApEn$的估计值，记为：

$$ApEn(m,r,n)=\phi^m(r)-\phi^{m+1}(r) \tag{3-12}$$

显然，$ApEn$的大小与m和r的取值有关。Pincus建议，实践中可取$m=2$，$r=k\sigma_x$［$k=0.1\sim0.25\sigma_x$］，σ_x为原始水文时间序列$x(i)$（$i=1\sim n$）的标准差。

第三节 符号动力学

20 世纪 70 年代发展起来的 Lempel - Ziv 复杂度（Lempel - Ziv Complexity，简称 LZC）算法是一种简单易行的复杂性度量方法，该方法主要用于医学[40-43]、金融[44]、流型识别[45]等领域中，而在农业水文要素复杂度识别中的应用较少。

1965 年，Kolmogorov 首先定义了符号序列复杂度的概念，认为复杂性是产生某给定 {0，1} 序列所必需的最少的计算机程序的比特数，但描述很难通过一般的数学算法来实现[45]。1976 年，A. Lempel 和 J. Ziv 提出一种度量序列复杂性的符号动力学简单算法，该算法可以通过“复制和添加”两种简单操作来描述一个给定的数据序列，称为 Lempel - Ziv 复杂度（LZC）算法[46]。由于 LZC 算法适用于符号序列，所以应首先对数据序列进行符号化（粗粒化）处理[47]。目前有二值粗粒化和多值粗粒化[48]等多种序列粗粒化方法，最为常用的是二值粗粒化方法。

一、二值粗粒化 LZC 算法

对于某一给定的水文时间序列 $x_t(t=1, 2, \cdots, n)$，采用式（3 - 13）对序列 x_t 进行重构[40-42, 46,49]，记为 $S_t(t=1, 2, \cdots, n)$，即：

$$S_t=\begin{cases}0 & x_t<\overline{x}\\ 1 & x_t\geqslant\overline{x}\end{cases} \tag{3-13}$$

式中：$\overline{x}$为序列 x_t 的均值。

现对上述重构 {0，1} 序列 S_t 的 LZC 计算法则描述如下[42,44-47]：①令 S、Q 分别代表两个字符串，SQ 表示把 S、Q 两个字符串接而成的总字符串，$SQ\pi$ 表示把 SQ 中最后一个字符删去所得的字符串，$V(SQ\pi)$ 表示 $SQ\pi$ 所有不同子串的集合；②将 S、Q 初始化为 $S=S_1$，$Q=S_2$，则 $SQ\pi=S_1$；③假定 $S=S_1S_2S_3\cdots S_r$，$Q=S_{r+1}$，则 $SQ\pi=S_1S_2S_3\cdots S_r$，若 Q 可以从 $SQ\pi$ 中某个子串用“复制”方法得到，则 $Q\in V(SQ\pi)$，为 $SQ\pi$ 的一个子串；④保持 S 不变，将 Q 更新为 $Q=S_{r+1}S_{r+2}$，继续观察 $Q=S_{r+1}S_{r+2}$ 能否从 $SQ\pi$ 中某个子串用“复制”方法得到（此时，$SQ\pi$ 更新为 $SQ\pi=S_1S_2S_3\cdots S_rS_{r+1}$）；⑤如此反复进行，直到 $Q\notin V(SQ\pi)$ 为止。设此时 $Q=S_{r+1}S_{r+2}\cdots S_{r+i}$ 不是 $SQ\pi=S_1S_2S_3\cdots S_{r+i-1}$ 的一个子串，则用“添加”方法加上 S_{r+i}，并加上一个“添加”记号“ * ”。

重复上述步骤，直到 Q 取到最后一位 S_n 为止。记号“ * ”的个数反映了添加操作的次数，若在上述分析结束时以“ * ”结束，则记号“ * ”的个数就定义为序列 x_t 的复杂度 $c(n)$，否则，将记号“ * ”的个数加 1 作为 $c(n)$。

例如，将某逐月地下水埋深序列 H_t 粗化为下列字符串：

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

其中，“0”表示该逐月地下水埋深值小于序列平均值；“1”表示该逐月地下水埋深值大于等于序列平均值。按照二值粗粒化 LZC 算法，上述字符串可分割为：

0* 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1* 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1* 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1* 1 1 1 1 1 1 0* 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1* 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
即被分割为 7 个子字符串，则该逐月地下水埋深序列的复杂度 $c(n)=7$。

A. Lempel 和 J. Ziv 的研究结果表明：当 $n\to\infty$ 时，几乎所有 {0，1} 随机序列其复杂度 $c(n)$ 都会趋向于一个值 $b(n)$[40-47,49]：

$$\lim_{n\to\infty} c(n)=b(n)=n/\log_2 n \tag{3-14}$$

$b(n)$ 是随机序列的渐进行为，可以用它来对 $c(n)$ 进行归一化处理，称为"归一化复杂度"[40-47,49]：

$$C_2=c(n)/\ b(n) \tag{3-15}$$

C_2 或 $c(n)$ 反映了给定序列随其长度的增加出现新模式的速率及其与随机序列的接近程度，可以捕捉序列的瞬时结构[40-43,45,46]。n 一定时，C_2 或 $c(n)$ 越大，序列复杂性越强，反之复杂性越弱。一般来说，当 $n\to\infty$ 时，完全随机序列的 $C_2\to 1$，周期序列的 $C_2\to 0$，介于两种情况之间的序列 $C_2\in(0,1)$[43-47,49]。因此，可以用 LZC 对地下水埋深序列变化的复杂性进行定量分析。

二、多值粗粒化 LZC 算法

由于二值粗粒化方法可能会丢失动力学系统的某些有用信息，因此，可以考虑采用多值粗粒化方法来重构时间序列[48,50]。对于前述的水文时间序列 x_t 采用式（3-16）对序列 x_t 进行重构，记为 $S_t(t=1，2，\cdots，n)$：

$$S_t=\begin{cases} S_j & x_{\min}+(j-1)d\leqslant x_t<x_{\min}+jd \\ S_l & x_t=x_{\max} \end{cases} \tag{3-16}$$

式中：S_t 为序列 x_t 经 l 段粗粒化后所生成的字符串；S_j 为两两互不相同的字符，$j=1，2，\cdots，l$；$x_{\max}$、$x_{\min}$ 分别为序列 x_t 的最大值和最小值；l 为将序列 x_t 中数据粗粒化的段数，$l>2$（$l=2$ 时仍然采用前述的二值粗粒化方法[48]），$d=(x_{\max}-x_{\min})\ /l$。

复杂度计算的前提是各符号在字符串中出现的概率 $p_j(j=1，2，\cdots，l)$ 应该相等，当 p_j 相差较大时，可以用归一化的信源熵 h_l 进行修正[41,51]：

$$h_l=\left(-\sum_{j=1}^{l} p_j\log_2 p_j\right)/\log_2 l \tag{3-17}$$

根据前述的 LZC 计算法则确定粗粒化段数为 l 时序列 x_t 的复杂度 $c_l(n)$，即可按式（3-18）计算序列 x_t 的多分段归一化复杂度[41,48,50,51]：

$$C_l=\frac{c_l(n)\log_l n}{h_l n} \tag{3-18}$$

第四节　分　形　理　论

由美国数学家 Mandelbrot 于 1977 年提出的分形理论适用于解决非线性环境中的一些随机分布问题，已经广泛用于工程[52,53]、金融[54]及医学[55]等领域中。大量研究表明，水

文现象具有统计自相似性[56,57]，即分形，这种自相似性为应用分形理论来揭示水文现象的复杂特征提供了基础[5,58]。描述系统分形特征的主要参数是分形维数（简称分维），分维值越大，系统越复杂，分维值越小，系统越简单[58-60]。因此，应用分形理论的关键在于分维的计算。计算分维值的方法有很多，包括 Hausdorff 维数法[61]、自相似维数法[62]、盒子维数法[63]、容量维数法[64]、信息维数法[65]、关联维数法[66]、Lyapunov 维数法[67]、数学形态学[68]等，其中，盒子维数法由于数学原理清晰、计算简便、高效而应用最为广泛[63,68]，但盒子维数法由于采用了规则划分网格的方法，因此，存在着分维估计不准确的问题[68,69]。本节介绍采用极差分析分形理论、小波变换分形理论提取分维值的方法。

一、极差分析分形理论

（一）Hurst 系数

1951 年，Hurst 与 Feller 几乎同时提出了定量表征时间序列持续性（或长程相依性）的 Hurst 系数[70]。由于 Hurst 系数是表示随机序列持续性（即模型相关结构）的一个非常重要的指标，因此，在时间序列分析中，Hurst 系数的估计占有十分重要的地位。最早的 Hurst 系数估计方法是 Hurst 于 1951 年提出的重标极差分析法（Resealed Range Analysis Method，简称极差分析法或 R/S 分析法）[5,71-73]，之后，Mandelbrot 与 Wallis 从理论上对该方法进行了补充和完善[74-76]。此外，Hurst 系数估计方法还包括方差时间法、绝对值法、留数法、周期图法及 Whittle 法[77,78]。

（二）Hurst 系数的极差分析法

设有水文序列 $x_t(t=1,2,\cdots,n)$，极差分析法计算过程如下[5,71]：

（1）计算中间序列 $s(t)$：

$$s(t)=\sum_{j=1}^{t}x(j)-t\overline{x}\quad(t=1,2,\cdots,n)\tag{3-19}$$

式中：$\overline{x}$为水文序列 x_t 的均值。

（2）计算极差：

$$R_n=R'_n/\sigma_x\tag{3-20}$$

式中：R_n 为序列 x_t 的极差；R'_n 为中间序列 $s(t)$ 的极差；σ_x 为序列 x_t 的标准差。

（3）计算 Hurst 系数。Hurst 通过大量的分析，发现水文序列 x_t 的极差 R_n 与样本容量 n 之间存在如下关系：

$$R_n=(n/2)^H\tag{3-21}$$

式中：H 为 Hurst 系数（也称为自相似指数）。$H=0\sim1$，当 $0\leqslant H<0.5$ 时，表示水文序列具有反持续性，且 H 越趋近 0，反持续性越强；当 $H=0.5$ 时，表示水文序列为独立随机序列；当 $H>0.5$ 时，表示水文序列具有持续性，且 H 越趋近 1，持续性越强[79,80]。

对式（3-21）两边取对数即可求得 Hurst 系数的极差估计量：

$$H_R=\frac{\ln R_n}{\ln n-\ln 2}\tag{3-22}$$

采用极差分析法计算 Hurst 系数对水文序列的长度比较敏感，因此计算结果存在不稳定因素。

（三）Hurst 系数与分维的关系

由分形理论可知，水文时间序列 Hurst 系数 H 与其分维数（盒子维数）D 之间存在以下关系[71,81-83]：

$$D=2-H \tag{3-23}$$

因此，计算水文时间序列的分形维数就可以先计算其 Hurst 系数，进而采用式（3-23）计算分维值 D。由于 $H=0\sim1$，因此，分维数 D 的取值范围为 $1\sim2$。

二、离散小波变换分形理论

（一）水文序列的统计自相似性

1. 定义

设某随机水文过程 $x(t)$，对任意 $a>0$，有[5,84]：

$$x(at)\doteq a^{H}x(t) \tag{3-24}$$

则 $x(t)$ 具有统计自相似性，称为统计自相似过程。

式中：$\doteq$ 为依概率分布相等；a 为尺度。

由前述可知，水文时间序列具有统计自相似性。

2. 自相似性过程的频谱特征

自相似性过程的均值、自相关函数和功率谱满足自相似性。因此，通过式（3-24）中的自相似指数 H 可获得任意尺度 a 下的统计特征。

统计自相似性过程 $x(t)$ 的谱密度函数 S 与角频率 ω 之间具有如下关系[5,58]：

$$S(\omega)\propto\frac{1}{|\omega|^{\alpha}} \tag{3-25}$$

式中：α 为频谱指数，$-1<\alpha<3$。

当 $1<\alpha<3$ 时，$\alpha=2H+1$，则 $x(t)$ 为分数布朗运动；当 $-1<\alpha<1$ 时，$\alpha=2H-1$，则 $x(t)$ 为分数高斯噪声。在实际应用中，ω 取正数才有意义。

（二）小波变换

小波变换是小波分析的核心。对于具有统计自相似性的水文随机过程 $x(t)$，若 $x(t)$ 是平方可积函数，即 $x(t)\in L^2(R)$（表示能量有限），则对于给定的小波函数 $\psi(t)$（称为母小波，其应满足 $\int_{-\infty}^{+\infty}\psi(t)\mathrm{d}t=0$ 容许性条件），水文时间序列 $x(t)$ 的连续小波变换可定义为[5,84-86]：

$$W_x(a,b)=\langle x(t),\psi_{a,b}(t)\rangle=|a|^{-\frac{1}{2}}\int_{-\infty}^{+\infty}x(t)\,\overline{\psi}(\frac{t-b}{a})\mathrm{d}t \tag{3-26}$$

式中：$W_x(a,b)$ 为小波变换系数；$\langle,\rangle$ 为内积；$\psi_{a,b}(t)$ 为由 $\psi(t)$ 伸缩和平移而成的一族函数，称为子小波；$\overline{\psi}(t)$ 为 $\psi(t)$ 的复共轭函数；a 为尺度伸缩因子；b 为时间平移因子。

在实际应用中，水文时间序列大多是离散的。例如 $x(k\Delta t)$（$k=1, 2, \cdots, n$；Δt 为取样时间间隔），则式（2-26）的离散形式（即离散小波变换）可定义为[5,20,87-89]：

$$W_x(a,b)=|a|^{-\frac{1}{2}}\Delta t\sum_{k=1}^{n}x(k\Delta t)\,\overline{\psi}\left(\frac{k\Delta t-b}{a}\right) \tag{3-27}$$

$W_x(a, b)$ 能同时反映时域参数 b 和频域参数 a 的特征，它是时间序列 $x(t)$ 通过单

位脉冲响应的滤波器的输出。当 a 较小时，对频域的分辨率较低，而对时域的分辨率较高；当 a 较大时，对频域的分辨率较高，而对时域的分辨率较低。因此，小波变换能实现窗口的大小固定、形状可变的时频局部化[5,84,90,91]。

根据分形理论，一个复杂系统各部分组成的几何形体间具有自相似性和标度不变性，即系统中的任一局部区域无论放大或缩小其特性都不会发生变化，整体中的每一个元素或局部都在一定程度上反映与体现着系统的特性与信息[5,84,92-94]。通过从大到小不同尺度的变换，在越来越小的尺度上就可以观察到复杂系统越来越丰富的细节，这恰好体现了小波理论的多分辨分析思想[5,84]。因此，可将小波分析与分形理论有机地结合起来，用于系统复杂性诊断。

（三）基于离散小波变换的水文序列分维估计

1. 基本思路

根据上述自相似性过程的频谱特征，结合式（3-23）可以得到分维数 D 与频谱指数 α 之间的关系[5,58]：

$$D=\begin{cases}1.5-0.5\alpha & -1<\alpha<1\\ 2.5-0.5\alpha & 1<\alpha<3\end{cases} \tag{3-28}$$

由式（3-28）可知，要获得 $x(t)$ 的分维值 D，首先要求得频谱指数 α。

小波分析具有时频多分辨率功能，不同尺度的小波变换序列具有统计自相似性，因此，利用小波分析可以很方便地求得频谱指数 α，进而计算分维值 D。

2. α 的频谱法估计

设有水文时间序列 $\{x(t),\ t=1,\ 2,\ \cdots,\ n\}$，其二进离散小波变换定义为[5,58,95-97]：

$$d_{j,k}=\langle x(t),\psi_{j,k}(t)\rangle=\int x(t)\,\overline{\psi}_{j,k}(t)\mathrm{d}t \tag{3-29}$$

式中：$d_{j,k}$为 $x(t)$ 在尺度 j 下的离散小波变换系数；$\overline{\psi}_{j,k}(t)$ 为 $\psi_{j,k}(t)$ 的复共轭；$\psi_{j,k}(t)$ 为二进离散小波，$\psi_{j,k}(t)=2^{-j/2}\psi(2^{-j}t-k)$，$j$、$k\in Z$（$Z$ 为正整数）。

现从能量角度推导频谱指数 α 的估计方程。要求基小波函数具有 $R(\geqslant\alpha/2)$ 阶消失矩。小波变换系数 $d_{j,k}$在 $2^{-j}\omega_0$（ω_0 为基小波函数的参考频率）处的能量谱为[5,58,98]：

$$S(2^{-j}\omega_0)=\frac{1}{n_j}\sum_{k=1}^{n_j}|d_{j,k}|^2 \tag{3-30}$$

式中：n_j 为尺度 j 下小波变换系数 $d_{j,k}$的样本个数。

根据上述自相似性过程的频谱特征，则有：

$$S(2^{-j}\omega_0)\propto(2^{-j}\omega_0)^{-\alpha} \tag{3-31}$$

将式（3-31）代入式（3-30），两边取对数，可得 $\log_2\left(\frac{1}{n_j}\sum_{k=1}^{n_j}|d_{j,k}|^2\right)$ 与 j 的一元线性回归方程：

$$\log_2\left(\frac{1}{n_j}\sum_{k=1}^{n_j}|d_{j,k}|^2\right)=j\alpha+c_0 \tag{3-32}$$

式中：α 为直线斜率，即频谱指数；c_0 为常数。

3. 基于 DWT 的分维计算步骤

分维估计的关键在于离散小波变换系数的计算和线性回归方程的求解，具体步骤如下[5,58]：

（1）计算小波变换系数。选取合适的小波函数或滤波器［在进行小波分维估计时，一般选用 Daubechies（DbN）小波系、Coiflets（CoifN）小波系、Symlets（SymN）小波系和 Meyer 小波等正交小波函数］，对水文序列 $x(t)$ 进行逐级分解，得到不同尺度 $j(j=1, 2, \cdots, M$；M 为最大分解级数）下的离散小波变换系数 $d_{j,k}$。

（2）计算尺度 j 下小波变换系数能谱的对数：

$$y_j = \log_2\left(\frac{1}{n_j}\sum_{k=1}^{n_j}|d_{j,k}|^2\right) \quad (j=1,2,\cdots,M) \tag{3-33}$$

（3）估计频谱指数 α 和常数项 c_0。建立回归方程，采用最小二乘法拟合回归曲线，确定频谱指数 α 和常数项 c_0 的估计值 $\hat{\alpha}$、$\hat{c}_0$。

（4）根据式（3-28）计算水文序列 $x(t)$ 的分维值。

三、连续小波变换分形理论

（一）基本思路

借助小波分析的时频多分辨率功能求得自相似指数 H，即可利用式（3-23）确定序列 $x(t)$ 的分维值 D。

（二）H 的频谱法估计

对于统计自相似性过程 $x(t)$，其能量谱 $\Gamma_x(\omega)$ 与频率 ω 之间具有如下关系[5,84,99]：

$$\Gamma_x(\omega) \propto \frac{1}{\omega^{\alpha}} \tag{3-34}$$

由于 ω 与尺度 a 之间具有倒数关系，因此，式（3-34）可以改写为：

$$\Gamma_x(a) \propto a^{\alpha} \tag{3-35}$$

对于水文时间序列 $\{x(t), t=1,2,\cdots,n\}$，采用式（3-26）计算得到不同尺度 a_j 下的连续小波变换系数 $W_x(a_j, b)$，$W_x(a_j, b)$ 在尺度 a_j 下的能量谱 $\Gamma_x(a_j)$ 为：

$$\Gamma_x(a_j) = \sum_{b=1}^{n}\frac{[W_x(a_j,b)]^2}{n} \tag{3-36}$$

将式（3-36）代入式（3-35），然后两边取对数得：

$$\lg[\Gamma_x(a_j)] = \alpha \lg a_j + c_0 \tag{3-37}$$

式（3-37）是 $\lg[\Gamma_x(a_j)]$ 与 $\lg a_j$ 的一元线性回归方程，直线的斜率即为频谱指数 α。然后根据 H 与 α 之间的关系：

$$H=\begin{cases}\dfrac{\alpha+1}{2} & -1<\alpha<1\\[2ex] \dfrac{\alpha-1}{2} & 1<\alpha<3\end{cases} \tag{3-38}$$

即可计算得到 H。

（三）基于 CWT 的分维计算步骤

分维估计的关键在于连续小波变换系数的计算和线性回归方程的求解，具体步骤

如下[5,84]：

（1）计算连续小波变换系数。选用适当的小波函数，利用式（3－26）对水文时间序列 $x(t)$ 进行连续小波分解，得到不同尺度 a_j（$j=1, 2, \cdots, M$；M 为最大分解次数）下的小波变换系数 $W_x(a_j, b)$。

（2）利用式（3－36）计算尺度 a_j 下的小波变换系数能量谱 y_j，$y_j=\Gamma_x(a_j)$。

（3）估计频谱指数 α 和常数项 c_0。建立 $\lg y_j$ 与 $\lg a_j$ 的回归方程，采用最小二乘法拟合回归曲线，确定频谱指数 α 和常数项 c_0 的估计值 $\hat{\alpha}$、$\hat{c}_0$。

（4）根据式（3－38）计算 H，进而计算水文序列 $x(t)$ 的分维值 D。

参 考 文 献

[1] 刘峰涛．从意向性到映射：系统复杂性测度的理论架构［J］．科学学研究，2009，27（7）：968－975.

[2] 史健芳，张富军，郝宝峰．基于小波变换和数学形态学的图像分割算法［J］．太原理工大学学报，2009，40（5）：490－493.

[3] Musha T. Calculation of instantaneous radiation characteristics using the wavelet transform［J］．Applied Acoustics，2004，65（7）：705－718.

[4] 耿杰，陈安方，潘双进．用小波变换方法提取地下流体观测异常信息［J］．地震研究，2009，32（1）：12－17.

[5] 王文圣，丁晶，李跃清．水文小波分析［M］．北京：化学工业出版社，2005.

[6] 王烁．小波变换与 Fourier 变换的比较［J］．河北理工大学学报（自然科学版），2008，30（2）：23－26.

[7] 杨济源，李晓平．小波变换在试井数据处理中的应用［J］．钻采工艺，2009，32（5）：42－44.

[8] 夏振炎，姜楠，王玉春，等．基于小波变换的高超声速边界层动态图像分析［J］．实验流体力学，2009，23（3）：85－89.

[9] Subasi A，Kiymik M K，Akin M，et al. Automatic recognition of vigilance state by using a wavelet-based artificial neural network［J］．Neural Comput & Applic，2005，14（1）：45－55.

[10] 臧玉萍，张德江，王维正．基于小波变换技术的发动机异响故障诊断［J］．机械工程学报，2009，45（6）：239－245.

[11] 滕军，朱焰煌，周峰，等．基于复 Morlet 小波变换的大跨空间结构模态参数识别研究［J］．振动与冲击，2009，28（8）：25－29.

[12] Huang X J，Choi Y K，Yun K S，et al. Oscillating behaviour of hazardous gas on tin oxide gas sensor：Fourier and wavelet transform analysis［J］．Sensors and Actuators B：Chemical，2006，115（1）：357－364.

[13] 张海波，叶晓慧．一种改善微弱信号信噪比的小波变换消噪法［J］．现代电子技术，2009（4）：124－126，130.

[14] Prikler S，Einax J W. Wavelet transform as a new approach to the enhancement of signal-o-noise ratio in anodic stripping voltammetry［J］．Analytical and Bioanalytical Chemistry，2009，395（6）：1707－1711.

[15] Bayissaa W L，Haritosa N，Thelandersson S. Vibration－based structural damage identification using wavelet transform［J］．Mechanical Systems and Signal Processing，2008，22（5）：1194－1215.

[16] Ni S H, Lo K F, Lehmann L, et al. Time-frequency analyses of pile-integrity testing using wavelet transform [J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35 (4): 600 - 607.

[17] 孙卫国，程炳岩．交叉小波变换在区域气候分析中的应用 [J]. 应用气象学报，2008，19 (4)：479 - 487.

[18] Belova N Y, Mihaylov S V, Piryova B G.. Wavelet transform: A better approach for the evaluation of instantaneous changes in heart rate variability [J]. Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical, 2007, 131 (1 - 2): 107 - 122.

[19] 杨稣，史耀媛，宋恒．基于小波变换域的 SVM 股市时间序列预测算法 [J]. 科学技术与工程，2008，8 (12)：3171 - 3174.

[20] 刘东，付强．基于小波变换的三江平原井灌区主汛期降水序列多时间尺度分析 [J]. 水土保持研究，2008，15 (6)：42 - 45.

[21] 丁素英．基于小波变换的 Laplacian 金字塔图像数据压缩 [J]. 潍坊学院学报，2009，9 (4)：34 - 36.

[22] 陈增强，任东，袁著祉，等．基于多分辨率学习的正交基小波神经网络设计 [J]. 系统工程学报，2003，18 (3)：218 - 223.

[23] 周惠成，彭勇．基于小波分解的月径流预测校正模型研究 [J]. 系统仿真学报，2007，19 (5)：1104 - 1108.

[24] Salajegheh E, Heidari A. Time history dynamic analysis of structures using filter banks and wavelet transforms [J]. Computers and Structures, 2005, 83 (1): 53 - 68.

[25] Wegner F V, Both M, Fink R H A. Automated Detection of Elementary Calcium Release Events Using the À Trous Wavelet Transform [J]. Biophysical Journal, 2006, 90 (6): 2151 - 2163.

[26] 李致家，周轶，李志龙，等．小波变换与 BP 神经网络耦合的洪水预报方法 [J]. 水力发电学报，2009，28 (2)：20 - 24，19.

[27] 李贤彬，丁晶，李后强．水文时间序列的子波分析法 [J]. 水科学进展，1999，10 (2)：144 - 149.

[28] Figliola A, Serrano E. Analysis of physiological time series using wavelet transforms [J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 1997, 16 (3): 74 - 79.

[29] Pincus S M. Approximate entropy as a measure of system complexity [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A, 1991, 88 (6): 2297 - 2301.

[30] 林丽，赵德有．近似熵在声发射信号处理中的应用 [J]. 振动与冲击，2008，27 (2)：99 - 102，128.

[31] 佟春生，黄强，刘涵，等．基于近似熵的径流序列复杂性研究 [J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2005，33 (6)：121 - 126.

[32] 王启光，张增平．近似熵检测气候突变的研究 [J]. 物理学报，2008，57 (3)：1976 - 1983.

[33] 刘峰涛，贺国光．基于近似熵和统计复杂度的交通流复杂性测度 [J]. 中国公路学报，2007，20 (4)：108 - 112.

[34] 杨福生，廖旺才．近似熵：一种适用于短数据的复杂性度量 [J]. 中国医疗器械杂志，1997，21 (5)：283 - 286.

[35] 陈晓平，和卫星，姚静．基于小波变换与近似熵的睡眠分期研究 [J]. 中国组织工程研究与临床康复，2008，12 (9)：1701 - 1704.

[36] Georgoulis A D, Moraiti C, Ristanis S, et al. A Novel Approach to Measure Variability in the Anterior Cruciate Ligament Deficient Knee During Walking: The Use of the Approximate Entropy in Orthopaedics [J]. Journal of Clinical Monitoring and Computing, 2006, 20 (1): 11 - 18.

[37] 洪波，唐庆玉，杨福生，等．近似熵、互近似熵的性质、快速算法及其在脑电与认知研究中的初



步应用 [J]. 信号处理，1999，15 (2)：100 - 108.

[38] Yan R，Gao R X. Approximate Entropy as a diagnostic tool for machine health monitoring [J]. Mechanical Systems and Signal Processing，2007，21 (2)：824 - 839.

[39] 齐子元，徐章遂，卢志才．近似熵在发动机故障诊断中的应用研究 [J]. 军械工程学院学报，2008，20 (2)：39 - 42.

[40] Hornero R，Aboy M，Abásolo D. Analysis of intracranial pressure during acute intracranial hypertension using Lempel - Ziv complexity：further evidence [J]. Medical and Biological Engineering and Computing，2007，45 (6)：617 - 620.

[41] Zhang X S，Roy R J. Predicting movement during anaesthesia by complexity analysis of electroencephalograms [J]. Medical and Biological Engineering and Computing，1999，37 (1)：327 - 334.

[42] Abásolo D，Hornero R，Gómez C，et al. Analysis of EEG background activity in Alzheimer's disease patients with Lempel - Ziv complexity and central tendency measure [J]. Medical Engineering & Physics，2006，28 (4)：315 - 322.

[43] 胡江和，张佃中．心电 RR 间期序列的近似熵与 Lempel－Ziv 复杂度分析 [J]. 中国医学物理学杂志，2007，24 (6)：447 - 449，414.

[44] 肖辉，吴冲锋，吴文锋，等．复杂性度量法在股票市场中的应用 [J]. 系统工程理论方法应用，2002，11 (3)：190 - 192，197.

[45] 周云龙，陈飞．水平气液两相流流型空间图像信息复杂性测度分析 [J]. 化工学报，2008，59 (1)：64 - 69.

[46] 王文圣，黄伟军，丁晶．基于小波消噪和符号动力学的径流变化复杂性研究 [J]. 水科学进展，2005，16 (3)：380 - 383.

[47] 解幸幸，李舒，张春利，等．Lempel－Ziv 复杂度在非线性检测中的应用研究 [J]. 复杂系统与复杂性科学，2005，2 (3)：61 - 66.

[48] 张佃中．非线性时间序列互信息与 Lempel－Ziv 复杂度的相关性研究 [J]. 物理学报，2007，56 (6)：3152 - 3157.

[49] 金宁德，董芳，赵舒．气液两相流电导波动信号复杂性测度分析及其流型表征 [J]. 物理学报，2007，56 (2)：720 - 729.

[50] 张佃中，谭小红，王智，等．基于等概率粗粒化的复杂度算法及其应用 [J]. 系统仿真学报，2008，20 (15)：4096 - 4098，4103.

[51] Kasper F，Schuster H G. Easily calculable measure for the complexity of spatiotemporal patterns [J]. Physical Reivew A，1987，36 (2)：842 - 848.

[52] 武晋芳，冯玉广．山西省城镇体系结构的分形分析 [J]. 系统科学学报，2008，16 (4)：59 - 63，94.

[53] 钟亮，许光祥．分形理论在紊流与泥沙研究中的应用现状 [J]. 重庆交通大学学报（自然科学版），2008，27 (5)：806 - 811.

[54] 孙金花，冯英浚，胡健．基于分形理论的股票时序数据离群模式挖掘研究 [J]. 运筹与管理，2008，17 (5)：135 - 140.

[55] Paramanathan P，Uthayakumar R. Application of fractal theory in analysis of human electroencephalographic signals [J]. Computers in Biology and Medicine，2008，38 (3)：372 - 378.

[56] 李长兴．论流域水文尺度化和相似性 [J]. 水利学报，1995，26 (1)：40 - 46，62.

[57] 丁晶，王文圣．水文相似和尺度分析 [J]. 水电能源科学，2004，22 (1)：1 - 4.

[58] 王文圣，向红莲，赵东．水文序列分形维数估计的小波方法 [J]. 四川大学学报（工程科学版），2005，37 (1)：1 - 4.

[59] 张鹏．基于小波理论的白鹤隧道围岩稳定性非线性研究 [D]. 长春：吉林大学，2009.



[60] 刘少鹏，郝群，宋勇，等．基于区域分维和非采样 Contourlet 变换的图像融合算法 [J]．光子学报，2010，39 (8)：1388-1393.

[61] 陈奕，许有鹏，宋松．基于“压力—状态—响应”模型和分形理论的湿地生态健康评价 [J]．环境污染与防治，2010，32 (6)：27-31，59.

[62] 王鲜霞，魏毅强，冯国瑞．冒矸破碎分形模型的建立与维数解析 [J]．太原理工大学学报，2008，39 (5)：530-532.

[63] 张建龙，韩宇平，申瑜．分形理论在降雨研究中的应用 [J]．东北水利水电，2007，25 (10)：6-8.

[64] 刘招，燕爱玲，吴新．基于分形维数的汛期洪水分期 [J]．人民黄河，2010，32 (8)：47-49.

[65] 徐卫红，王艾平，章志琴．武夷山香果树种群格局的分形特征——信息维数 [J]．浙江林业科技，2010，30 (2)：31-35.

[66] 张勇，关伟．交通流时间序列的分形实证研究 [J]．公路交通科技，2010，27 (5)：100-103，116.

[67] 江龙平，徐可君，唐有才．基于分形维数的转子—机匣系统故障诊断研究 [J]．机械强度，2009，31 (4)：532-536.

[68] 李兵，张培林，任国全，等．基于数学形态学的分形维数计算及在轴承故障诊断中的应用 [J]．振动与冲击，2010，29 (5)：191-194.

[69] Chaudhuri B B，Sarkar N. Texture segmentation using fractal dimension [J]．IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence，1995，17 (1)：72-77.

[70] Wallis J R，Matalas N C. Small sample properties of H and K—Estimations of the Hurst coefficient h [J]．Water Resource Research，1970，6 (6)：1583-1594.

[71] 李贤彬，丁晶，李后强．水文序列 Hurst 系数的子波估计 [J]．水利学报，1999，30 (8)：21-25.

[72] 张丽旭，赵敏，付旭强，等．近 22 年来象山港海域水环境变化趋势及 R/S 预测研究 [J]．海洋湖沼通报，2010 (1)：115-120.

[73] 路剑飞，陈子燊，刘曾美．珠江口海平面特征分析 [J]．海洋通报，2010，29 (3)：241-246.

[74] Mandelbrot B B，Wallis J R. Robustness of the rescaled ranged R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence [J]．Water Resources Research，1969，5 (5)：967-988.

[75] 彭锐，黄河清，郑林．鄱阳湖区 1959 年至 2005 年降水过程的持续性特征与减灾对策 [J]．资源科学，2009，31 (5)：731-742.

[76] 李远耀，殷坤龙，程温鸣．R/S 分析在滑坡变形趋势预测中的应用 [J]．岩土工程学报，2010，32 (8)：1291-1296.

[77] 陈建，谭献海，贾真．7 种 Hurst 系数估计算法的性能分析 [J]．计算机应用，2006，26 (4)：945-947，950.

[78] 梅宏标，王坚，张慧哲．城市快速路交通流分形预测算法的研究 [J]．公路交通科技，2009，26 (10)：105-110.

[79] 蔡锡填，徐宗学，李占玲．漳卫南运河流域水文气象要素长期变化趋势分析 [J]．资源科学，2008，30 (3)：363-370.

[80] 王双银，朱晓群，曹红霞．关中西部四灌区河源来水时序变化特征分析 [J]．节水灌溉，2010，(12)：4-8，12.

[81] 李嫦楷，李毅．玛纳斯河肯特瓦特站年径流序列分形分析 [J]．水电能源科学，2010，28 (7)：9-11，50.

[82] 艾学山，董前进，王先甲，等．小波分维估计法在三峡水库汛期洪水分期中的应用 [J]．系统工程理论与实践，2009，29 (1)：145-151.



[83] 高召宁，孟祥瑞，王向前．矿井涌水量时间序列的长程相关性分析及分维数估算 [J]. 水文地质工程地质，2010，37 (3)：31－35.

[84] 王文圣，向红莲，黄伟军，等．基于连续小波变换的径流分维研究 [J]. 水利学报，2005，36 (5)：598－601.

[85] 刘东，付强．小波随机耦合模型在三江平原井灌区地下水位预测中的应用 [J]. 数学的实践与认识，2008，38 (16)：54－62.

[86] 任永峰，安中全，赵喜，等．采用小波变换和同相位补偿的不间断动态电压恢复器 [J]. 高电压技术，2010，36 (3)：757－762.

[87] 孟凡香，徐淑琴，李天霄，等．基于离散小波变换的水稻生育期降水量多时间尺度特征分析 [J]. 黑龙江水专学报，2010，37 (1)：104－106.

[88] Subasi A，Kiymik M K，Akin M，et al. Automatic recognition of vigilance state by using a wavelet－based artificial neural network [J]. Neural Comput & Applic，2005，14 (1)：45－55.

[89] 杨艳，李靖，马显莹，等．基于小波神经网络的城市用水量长期预测研究 [J]. 云南农业大学学报，2010，25 (2)：272－276.

[90] 罗新宁，农万江．小波分析在农业气象灾害周期分析中的应用 [J]. 安徽农学通报，2010，16 (5)：173－179.

[91] 吕静渭，马孝义，高文强，等．近 70 年来泾河年径流量周期变化的小波分析 [J]. 人民黄河，2010，32 (2)：49－50，67.

[92] 刘起方，马光文，刘群英，等．基于分形插值理论的径流预测探讨 [J]. 水力发电学报，2008，27 (4)：20－25.

[93] 田丰，王晋国，王明祥．基于分形理论的地震数据分析 [J]. 长安大学学报（自然科学版），2008，28 (2)：108－110.

[94] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature [M]. New York：W. H. Freeman and Company，1982.

[95] 刘伟，王昊，左言言，等．小波分析在柴油机噪声分析中的应用 [J]. 江苏理工大学学报（自然科学版），2000，21 (5)：34－37.

[96] 张雨，罗超，张志沛．柴油机强噪信号的小波去噪辨识 [J]. 内燃机学报，2001，19 (4)：365－368.

[97] 戴君．基于小波变换的电力系统谐波分析与检测方法研究 [D]. 无锡：江南大学，2008.

[98] Abry P，Veiteh D. Wavelet analysis of long－range－dependence traffic [J]. IEEE Transactions on Information Theory，1998，44 (1)：2－15.

[99] Wornell G. Signal processing with fractal：a wavelet based approach [M]. NJ：Prentice Hall PTR，1995.



第四章　区域农业水文系统复杂性测度

地下水资源是区域农业生产的重要战略基础资源。地下水资源系统是一个复杂系统[1]，包括水位、水质、水量、水温等系统要素，其中，地下水水位是最为敏感和活跃的系统要素。建三江分局作为黑龙江省重要产粮区，长期高强度开采地下水发展水田面积（2006年，井灌比例为97%；2007年，井灌比例为97.7%），再加上气候条件（降水、蒸发、气温）、水文地质条件（补给条件）等自然因素的影响[2,3]，使得建三江分局地下水埋深的非线性、随机等复杂性特征日益明显。目前，国内外有关于地下水埋深序列复杂性的研究未见报道。因此，有必要对建三江分局地下水埋深序列复杂性进行研究。

降水是区域水资源的根本来源[4,5]，降水量的多少直接影响着区域水资源的开发利用[6-8]，是区域水旱灾害的关键驱动因子，也是区域社会经济发展的关键制约因子。在各种自然因素［太阳活动周期、ENSO事件、火山爆发[9]、台风路径[10]、地形（坡向、海拔）[11,12]、地理位置[13]等］及人类活动（植树造林、毁湿开荒、兴建水利工程[9,14]等）的影响下，降水表现为一个复杂的水文过程。在其形成、发生、发展的全过程中所表现出的不确定性与随机性往往难以定量描述，因此，在分析降水序列发展态势之前，有必要探索并揭示其复杂行为机制[6,7]。

系统复杂性往往是通过系统构成要素的复杂变化反映出来的，这就使得区域农业水文系统复杂性可以通过其系统要素（地下水水位、降水、蒸发等）复杂性来表征[15,16]。

近些年来，国内外学者在揭示降水序列复杂行为机制特别是其混沌特性方面，做了大量的研究工作。门宝辉等、石教智等、袁鹏等、王德智等、于延胜等、牟丽琴等及Dhanya C T等分别采用混沌理论对长江上游川中地区年降水序列、广东省东江流域月降水序列、四川省6个水文站（成都、乐山、雅安、西昌、广元、若尔盖）的月降水序列、东北地区四大水库（白山、丰满、桓仁、云峰）控制流域的月降水序列、福州市区不同时间间隔（$\Delta t=1$、2、3、6）的月降水序列、汀江流域上杭水文站月降水序列及印度3个不同区域（Malaprabha、Mahanadi、All－India）日降水序列的混沌特性进行了分析[7,8,17-21]。而系统复杂性的表征除了混沌特性之外，至少还应包括随机性、非线性及分形等基本属性[22,23]。因此，本章尝试从认知水文时间序列随机性、非线性及分形特征的角度出发，采用第三章提出的复杂性度量方法，测度建三江分局逐月地下水埋深序列、季节降水序列的复杂性，计算综合复杂度指数，揭示逐月地下水埋深序列、季节降水序列复杂性的地域差异，为地下水埋深发展态势分析与地下水资源分区管理及进一步分析降水旱涝变化规律提供依据。

第一节　基于小波变换信息量系数的水文序列复杂性研究

本节尝试采用基于小波变换的信息量系数（WT－ICF）方法，对建三江分局逐月地



下水埋深序列与季节降水序列复杂性进行测度分析。

一、WT－ICF 在建三江分局地下水埋深序列复杂性测度中的应用

（一）资料来源与处理

从黑龙江省农垦总局建三江分局水务局收集到建三江分局下属 15 个农场 1997～2007 年的 15 个逐月地下水埋深序列监测资料（$n=132$）。由于在所收集的地下水埋深序列资料中，缺失创业农场 24 队 1997 年 8 月～1998 年 9 月、浓江农场 8 区 1997 年 1 月～1998 年 1 月、1998 年 8 月～1999 年 3 月、青龙山农场 17 队 1997 年 2～5 月、1998 年 1～2 月、1999 年 7～10 月、洪河农场 6 区 1998 年 2～4 月、1999 年 11 月～2000 年 3 月、2003 年 11 月～2004 年 3 月、二道河农场五区 1997 年 8 月～1998 年 3 月及前哨农场 12 队 1997 年 9 月～1998 年 10 月的监测数据，所以首先采用三次样条插值[24]、抛物线延拓[25]与对称延拓[26]相

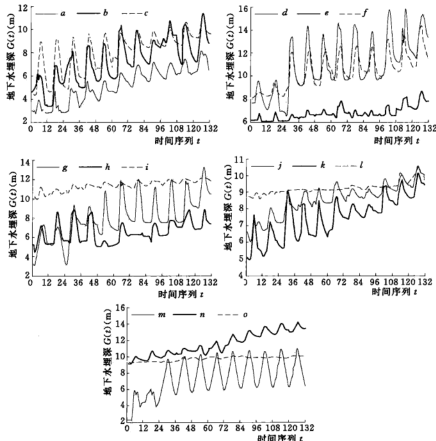


图 4－1　建三江分局各逐月地下水埋深序列变化曲线（1997～2007 年）

a—八五九农场 1 队；b—七星农场 69 队；c—前进农场 22 队；d—创业农场 24 队；e—鸭绿河农场 5 区；f—红卫农场 28 队；g—浓江农场 8 区；h—青龙山农场 17 队；i—勤得利农场 36 队；j—前锋农场场部；k—洪河农场 6 区；l—二道河农场 5 区；m—大兴农场 11 队；n—胜利农场 31 队；o—前哨农场 12 队

结合等方法对缺失的数据进行插值，然后绘制各逐月地下水埋深序列变化曲线，如图4-1所示。由图4-1可以看出，建三江分局各监测地点的地下水埋深总体呈逐渐增长的趋势。同时，这15个地下水埋深序列虽然具有明显的周期特性，但由于其均值、方差变化不平稳，属于非平稳时间序列，所以其动态变化还包含随机、非线性等复杂性特征。

（二）计算与分析

采用前述方法计算建三江分局各逐月地下水埋深序列信息量系数，结果见表4-1。

表4-1　建三江分局各逐月地下水埋深序列能量概率分布及信息量系数

长观井位置	长观井编号	分解尺度				ICF	排序
		1	2	3	4		
		能量概率分布 P_j（%）					
八五九农场1队	101	29.82	11.94	22.87	35.37	0.5731	③
七星农场69队	966901	51.60	17.87	11.34	19.19	0.5267	⑨
前进农场22队	02202—12	62.20	10.34	12.16	15.30	0.4662	⑭
创业农场24队	08cgj24—20	56.57	14.33	12.39	16.71	0.5031	⑫
鸭绿河农场5区	00—05	24.18	11.96	22.89	40.97	0.5647	④
红卫农场28队	960002801	56.30	13.70	11.83	18.17	0.5030	⑬
浓江农场8区	1508	50.82	14.47	15.02	19.69	0.5335	⑦
青龙山农场17队	1703	51.64	16.70	11.85	19.81	0.5271	⑧
勤得利农场36队	0436020	43.72	15.74	18.80	21.74	0.5640	⑤
前锋农场场部	锋—21号	26.90	14.84	23.00	35.26	0.5828	②
洪河农场6区	601	36.49	12.71	14.80	36.00	0.5562	⑥
二道河农场5区	二—18号	12.56	10.38	22.70	54.36	0.5053	⑪
大兴农场11队	20	78.65	14.79	4.76	1.80	0.2991	⑮
胜利农场31队	胜—8号	15.04	8.79	22.92	53.25	0.5089	⑩
前哨农场12队	12队17号	25.93	23.14	34.78	16.16	0.5865	①

由表4-1可知，建三江分局各逐月地下水埋深序列的复杂性排序为：前哨农场12队>前锋农场场部>八五九农场1队>鸭绿河农场5区>勤得利农场36队>洪河农场6区>浓江农场8区>青龙山农场17队>七星农场69队>胜利农场31队>二道河农场5区>创业农场24队>红卫农场28队>前进农场22队>大兴农场11队。前哨农场12队、前锋农场场部、八五九农场1队、鸭绿河农场5区、勤得利农场36队及洪河农场6区的ICF值均接近于0.6，熵值较高，说明这些区域的地下水埋深影响因子较多，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较强；其余监测地点的ICF值均小于0.55，熵值较低，说明这些区域的地下水埋深影响因子较少，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较弱；特别是大兴农场11队的ICF值小于0.3，熵值最低，说明该区域的地下水埋深影响因子最少，相关的地下水系统动力学结构复杂性最弱。

根据黑龙江省农垦总局建三江分局行政分布图，将建三江分局下属15个农场按照地理位置划分为北区、中区、南区3个部分，以各逐月地下水埋深序列作为所在农场代表，计算各分区平均信息量系数$\overline{ICF}$，见表4-2。由表4-2可以看出，建三江分局各分区逐月地下水埋深序列复杂性具有由北向南逐渐减弱的总体趋势。北区、中区和南区的$\overline{ICF}$值

均小于 0.55，熵值较低，说明各分区的地下水埋深影响因子较少，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较弱。

表 4－2　　建三江分局各分区逐月地下水埋深序列平均信息量系数

分　区	所　含　农　场	$\overline{\text{ICF}}$
北区	青龙山、勤得利、浓江、鸭绿河	0.5473
中区	前进、洪河、前锋、二道河、前哨	0.5394
南区	七星、创业、大兴、红卫、胜利、八五九	0.4857

二、WT－ICF 在建三江分局季节降水序列复杂性测度中的应用

（一）资料来源与处理

从黑龙江农垦建三江分局气象台收集到建三江分局下属 14 个农场逐月降水量及年降水量资料（浓江农场无降水监测资料）。由于在所收集的降水序列资料中，缺失鸭绿河农场 1997～2000 年的逐月降水监测数据，所以首先采用顺序（向右）与逆序（向左）[27,28]

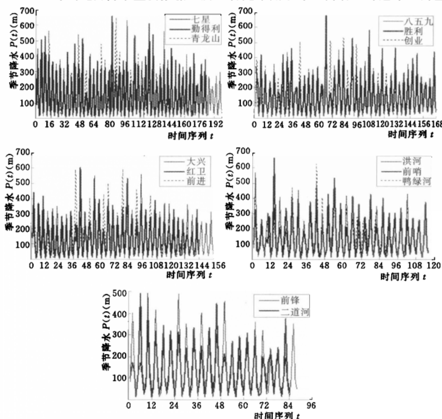


图 4－2　建三江分局各农场季节降水序列变化曲线

对称延拓相结合的方法对缺失的数据进行插值，然后分别计算各农场春季（3～5月）、夏季（6～8月）、秋季（9～11月）、冬季（12月至次年2月）[29-32]降水量，绘制季节降水序列变化曲线，见图4-2。由图4-2可以看出，建三江分局各农场季节降水序列具有较为明显的周期（1年）变化特征。同时，这14个季节降水序列虽然具有明显的周期特性，但由于其均值、方差变化不平稳，属于非平稳时间序列，所以其动态变化还包含随机、非线性等复杂性特征。

（二）计算与分析

采用前述方法计算建三江分局各农场季节降水序列信息量系数，结果见表4-3。

表4-3　建三江分局各农场季节降水序列能量概率分布及信息量系数

农　场	样本数	分解尺度				ICF	排序
		1	2	3	4		
		能量概率分布 P_j（%）					
七星	200	89.71	5.26	2.49	2.54	0.1901	⑥
勤得利	184	89.27	6.28	2.49	1.96	0.1929	⑤
青龙山	148	87.48	6.34	3.07	3.11	0.2201	①
八五九	168	90.21	6.10	2.46	1.23	0.1775	⑧
胜利	168	90.77	5.87	1.96	1.40	0.1699	⑩
创业	144	88.04	4.88	2.99	4.09	0.2150	②
大兴	156	90.59	5.58	2.13	1.70	0.1745	⑨
红卫	144	89.40	5.47	2.37	2.76	0.1940	④
前进	140	88.65	4.42	2.99	3.94	0.2072	③
洪河	104	91.76	4.42	1.85	1.97	0.1598	⑬
前哨	116	91.35	4.59	1.67	2.39	0.1658	⑪
鸭绿河	104	89.86	5.87	2.85	1.42	0.1843	⑦
前锋	88	91.52	4.22	2.21	2.05	0.1644	⑫
二道河	84	93.79	3.81	1.31	1.09	0.1263	⑭

由表4-3可知，建三江分局各农场季节降水序列的复杂性排序为：青龙山农场＞创业农场＞前进农场＞红卫农场＞勤得利农场＞七星农场＞鸭绿河农场＞八五九农场＞大兴农场＞胜利农场＞前哨农场＞前锋农场＞洪河农场＞二道河农场。各农场的ICF值均处于0.1～0.25之间，熵值较低，说明各农场的季节降水影响因子较少，相关的降水系统动力学结构复杂性较弱。

根据表4-3中各农场季节降水序列信息量系数计算结果，计算建三江分局各分区（北区、中区、南区）季节降水序列平均信息量系数$\overline{ICF}$，见表4-4。由表4-4可以看出，建三江分局季节降水序列复杂性北区最高，中区最低，南区居中。各分区的$\overline{ICF}$值均小于0.2，熵值较低，说明各分区的季节降水影响因子较少，相关的降水系统动力学结构复杂性较弱。

表 4-4　　建三江分局各分区季节降水序列平均信息量系数

分　区	所　含　农　场	$\overline{ICF}$
北区	青龙山、勤得利、鸭绿河	0.1991
中区	前进、洪河、前锋、二道河、前哨	0.1647
南区	七星、创业、大兴、红卫、胜利、八五九	0.1868

第二节　基于近似熵的水文序列复杂性研究

本节尝试采用近似熵（$ApEn$）方法，对建三江分局逐月地下水埋深序列与季节降水序列复杂性进行测度分析。

一、近似熵在建三江分局地下水埋深序列复杂性测度中的应用

（一）近似熵参数选择

1. 维数 m 的选择

根据 Pincus 的建议，实践中一般取 $m=2$。取 $m=1$ 或 $m>2$ 都会导致难以充分挖掘原始序列数据所蕴含的信息[33]。因此，本节选择维数 $m=2$。

2. 阈值 r 的选择

现取维数 $m=2$，$k=0.1$，0.13，0.15，0.18，0.2，0.23，0.25，计算 k 值对建三江分局各逐月地下水埋深序列 ApEn 值的影响，见表 4-5 和图 4-3。由表 4-5 和图 4-3 可知，随着 k 值的增加，八五九农场 1 队、七星农场 69 队、前进农场 22 队、创业农场 24 队、鸭绿河农场 5 区、红卫农场 28 队、浓江农场 8 区、青龙山农场 17 队、洪河农场 6 区的 $ApEn$ 值呈逐渐增长的态势，而勤得利农场 36 队、前锋农场场部、二道河农场 5 区、大兴农场 11 队、胜利农场 31 队及前哨农场 12 队的 $ApEn$ 值则具有先增加然后逐渐减小的波动特征。

表 4-5　　不同 k 值条件下建三江分局各逐月地下水埋深序列的 $ApEn$ 值

长观井位置	长观井编号	$ApEn$ (2, $k\sigma_x$)						
		k=0.1	k=0.13	k=0.15	k=0.18	k=0.2	k=0.23	k=0.25
八五九农场 1 队	0101	0.3865	0.4125	0.4624	0.5427	0.5880	0.6593	0.6651
七星农场 69 队	966901	0.3396	0.5136	0.5841	0.7031	0.7351	0.7081	0.7396
前进农场 22 队	02202—12	0.3965	0.5066	0.5415	0.6258	0.6365	0.6430	0.6714
创业农场 24 队	08cgj24—20	0.2998	0.4163	0.4435	0.4943	0.5880	0.6715	0.6731
鸭绿河农场 5 区	00—05	0.5182	0.5224	0.5139	0.5179	0.5682	0.5820	0.5821
红卫农场 28 队	960002801	0.3046	0.3494	0.3929	0.5021	0.5532	0.5621	0.5624
浓江农场 8 区	1508	0.3600	0.3984	0.4226	0.4453	0.4852	0.5361	0.5496
青龙山农场 17 队	1703	0.3198	0.3872	0.4291	0.5044	0.5433	0.5905	0.5928
勤得利农场 36 队	0436020	0.4832	0.5316	0.5929	0.6378	0.6119	0.5979	0.5680

续表

长观井位置	长观井编号	ApEn (2, $k\sigma_x$)						
		k=0.1	k=0.13	k=0.15	k=0.18	k=0.2	k=0.23	k=0.25
前锋农场场部	锋—21号	0.4423	0.5542	0.6284	0.6282	0.6426	0.6519	0.6375
洪河农场6区	601	0.2795	0.4254	0.4852	0.5627	0.6140	0.6367	0.6675
二道河农场5区	二—18号	0.3857	0.3871	0.4000	0.3602	0.3391	0.3163	0.3113
大兴农场11队	20	0.2981	0.4087	0.4380	0.4456	0.4294	0.4212	0.3848
胜利农场31队	胜—8号	0.4786	0.6350	0.6494	0.6786	0.6598	0.6399	0.5999
前哨农场12队	12队17号	0.5928	0.6424	0.6424	0.6490	0.6490	0.5979	0.5026

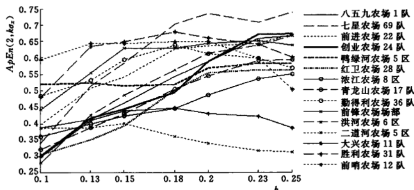


图4-3 各逐月地下水埋深序列 $ApEn$ 值随 k 值的变化曲线

进一步计算 k 值从0.1增加到0.25过程中，各地下水埋深序列 $ApEn$ 值的变幅，如图4-4所示。由图4-4可知，随着 k 值的增加，建三江分局各地下水埋深序列 $ApEn$ 值的变幅总体呈逐渐减小的趋势。当 $k=0.25$ 时，各地下水埋深序列的 $ApEn$ 值与 $k=0.23$ 时的 $ApEn$ 值相比，除前哨农场12队地下水埋深序列 $ApEn$ 值变幅达到15.94%之外，其余变幅均小于10%，平均变幅仅为3.83%，可以认为此时计算结果已经趋于稳定。因此，取 $k=0.25$，即 $r=0.25\sigma_x$。

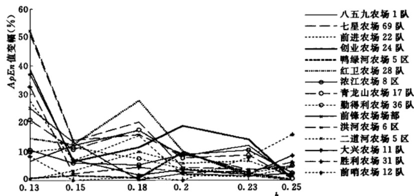


图4-4 各逐月地下水埋深序列 $ApEn$ 值变幅随 k 值的变化曲线

（二）计算结果及分析

采用 $ApEn$（2，$0.25\sigma_x$）对建三江分局各逐月地下水埋深序列的复杂性进行排序。由表 4－5 可知，建三江分局各逐月地下水埋深序列的复杂性排序为：七星农场 69 队＞创业农场 24 队＞前进农场 22 队＞洪河农场 6 区＞八五九农场 1 队＞前锋农场场部＞胜利农场 31 队＞青龙山农场 17 队＞鸭绿河农场 5 区＞勤得利农场 36 队＞红卫农场 28 队＞浓江农场 8 区＞前哨农场 12 队＞大兴农场 11 队＞二道河农场 5 区。七星农场 69 队、创业农场 24 队、前进农场 22 队、洪河农场 6 区、八五九农场 1 队及前锋农场场部的 $ApEn$ 值均处于 0.6～0.8 之间，熵值较高，说明这些区域的地下水埋深影响因子较多，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较强；其余监测地点的 $ApEn$ 值均小于 0.6，熵值较低，说明这些区域的地下水埋深影响因子较少，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较弱；特别是二道河农场 5 区的 $ApEn$ 值略高于 0.3，熵值最低，说明该区域的地下水埋深影响因子最少，相关的地下水系统动力学结构复杂性最弱。

以各逐月地下水埋深序列作为所在农场代表，计算建三江分局各分区平均近似熵 $\overline{ApEn(2,\ 0.25\sigma_x)}$，见表 4－6。由表 4－6 可以看出，建三江分局逐月地下水埋深序列复杂性南区最高，中区最低，北区居中。北区和中区的 $\overline{ApEn(2,\ 0.25\sigma_x)}$ 值均处于 0.5～0.6 之间，南区的 $\overline{ApEn(2,\ 0.25\sigma_x)}$ 值略高于 0.6，熵值较低，说明各分区的地下水埋深影响因子较少，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较弱。

表 4－6　建三江分局各分区逐月地下水埋深序列平均近似熵

分　区	所　含　农　场	$\overline{ApEn(2,\ 0.25\sigma_x)}$
北区	青龙山、勤得利、浓江、鸭绿河	0.5731
中区	前进、洪河、前锋、二道河、前哨	0.5581
南区	七星、创业、大兴、红卫、胜利、八五九	0.6042

二、近似熵在建三江分局季节降水序列复杂性测度中的应用

（一）近似熵参数选择

1. 维数 m 的选择

结合前述分析，选择维数 $m=2$。

2. 阈值 r 的选择

现取维数 $m=2$，$k=0.1$，0.13，0.15，0.18，0.2，0.23，0.25，计算 k 值对建三江分局各农场季节降水序列 ApEn 值的影响，见表 4－7 和图 4－5。由表 4－7 和图 4－5 可知，随着 k 值的增加，青龙山、八五九、前进、前哨、鸭绿河及前锋农场的 $ApEn$ 值呈逐渐增长的态势，而其余几个农场的 $ApEn$ 值则具有先增加然后逐渐减小的波动特征。

表 4-7　　不同 k 值条件下建三江分局各农场季节降水序列的 $ApEn$ 值

农　场	样本数	$ApEn$ (2, $k\sigma_x$)						
		k=0.1	k=0.13	k=0.15	k=0.18	k=0.2	k=0.23	k=0.25
七星	200	0.7473	0.8506	0.8815	0.9386	0.9081	0.8675	0.8404
勤得利	184	0.7111	0.8719	0.8966	0.9124	0.9270	0.9298	0.8959
青龙山	148	0.5051	0.6529	0.7543	0.8700	0.8738	0.8986	0.9064
八五九	168	0.5331	0.7361	0.7832	0.8652	0.9121	0.9189	0.9288
胜利	168	0.6273	0.7525	0.8207	0.8697	0.8522	0.8239	0.8173
创业	144	0.5849	0.7675	0.7703	0.7988	0.8012	0.7946	0.7969
大兴	156	0.5543	0.6956	0.7208	0.7658	0.7975	0.8264	0.7981
红卫	144	0.4568	0.6469	0.7574	0.8057	0.8419	0.8289	0.8248
前进	140	0.5081	0.6444	0.7154	0.8141	0.8536	0.8860	0.9091
洪河	104	0.3992	0.5708	0.6419	0.7620	0.7894	0.8042	0.8007
前哨	116	0.3374	0.5213	0.6189	0.7290	0.7733	0.8124	0.8482
鸭绿河	104	0.2430	0.3830	0.4975	0.6257	0.7381	0.7604	0.8129
前锋	88	0.2944	0.4692	0.5099	0.6222	0.6635	0.7065	0.7240
二道河	84	0.2799	0.4679	0.5920	0.6687	0.6518	0.6771	0.6338

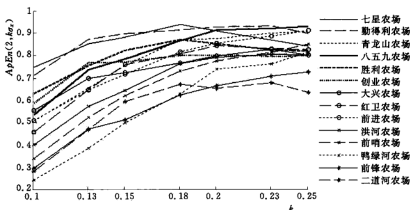


图 4-5　各农场季节降水序列 $ApEn$ 值随 k 值的变化曲线

进一步计算 k 值从 0.1 增加到 0.25 过程中，各农场季节降水序列 $ApEn$ 值的变化，如图 4-6 所示。由图 4-6 可知，随着 k 值的增加，建三江分局各农场季节降水序列 $ApEn$值的变幅总体呈逐渐减小的趋势。当 k=0.25 时，各农场季节降水序列的 $ApEn$ 值与k=0.23 时的 $ApEn$ 值相比，除鸭绿河农场和二道河农场季节降水序列 $ApEn$ 值变幅分别达到 6.90%和 6.39%之外，其余变幅均小于 5%，平均变幅仅为 2.64%，可以认为此时计算结果已经趋于稳定。因此，取 k=0.25，即 $r=0.25\sigma_x$。

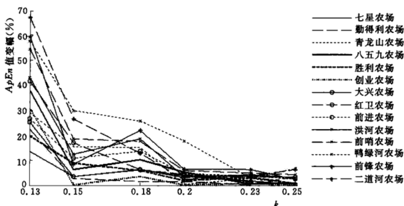


图 4-6　各农场季节降水序列 $ApEn$ 值变幅随 k 值的变化曲线

（二）计算结果及分析

采用 $ApEn$（2，$0.25\sigma_x$）对建三江分局各农场季节降水序列的复杂性进行排序。由表 4-7 可知，建三江分局各农场季节降水序列的复杂性排序为：八五九农场＞前进农场＞青龙山农场＞勤得利农场＞前哨农场＞七星农场＞红卫农场＞胜利农场＞鸭绿河农场＞洪河农场＞大兴农场＞创业农场＞前锋农场＞二道河农场。二道河农场的 $ApEn$ 值略高于 0.6，熵值较低，说明该农场的季节降水影响因子较少，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较弱；其余农场的 $ApEn$ 值均处于 0.7～1.0 之间，熵值较高，说明这些农场的季节降水影响因子较多，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较强。

根据表 4-7 中各农场季节降水序列近似熵计算结果，计算建三江分局各分区（北区、中区、南区）平均近似熵$\overline{ApEn(2,\ 0.25\sigma_x)}$，见表 4-8。由表 4-8 可以看出，建三江分局季节降水序列复杂性北区最高，中区最低，南区居中。各分区的$\overline{ApEn(2,\ 0.25\sigma_x)}$值均处于 0.7～0.9 之间，熵值较高，说明各分区的季节降水影响因子较多，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较强。

表 4-8　建三江分局各分区季节降水序列平均近似熵

分　区	所　含　农　场	$\overline{ApEn(2,\ 0.25\sigma_x)}$
北区	青龙山、勤得利、鸭绿河	0.8717
中区	前进、洪河、前锋、二道河、前哨	0.7832
南区	七星、创业、大兴、红卫、胜利、八五九	0.8344

第三节　基于符号动力学的水文序列复杂性研究

本节尝试采用 Lempel－Ziv 复杂度算法，对建三江分局逐月地下水埋深序列与季节降水序列复杂性进行测度分析。

一、LZC算法在建三江分局地下水埋深序列复杂性测度中的应用

取l=2、3、4、5、6、7、8，分别按照前述的二值粗粒化和多值粗粒化LZC算法计算建三江分局各逐月地下水埋深序列的归一化复杂度，计算结果见表4-9。各逐月地下水埋深序列的归一化复杂度随粗粒化段数的变化见图4-7。由表4-9和图4-7可以看出，随着粗粒化段数l的增加，各逐月地下水埋深序列的归一化复杂度均表现出增减交替变化的波动特征。

表4-9　不同粗粒化段数下建三江分局各逐月地下水埋深序列归一化复杂度

长观井位置	长观井编号	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
八五九农场1队	0101	0.3736	0.4565	0.4779	0.5223	0.5644	0.5330	0.6214
七星农场69队	966901	0.5870	0.6145	0.5944	0.6133	0.7465	0.7060	0.6737
前进农场22队	02202—12	0.4803	0.5661	0.5385	0.5720	0.6110	0.6331	0.6901
创业农场24队	08cgj24—20	0.4803	0.4959	0.5560	0.6183	0.6013	0.6811	0.6241
鸭绿河农场5区	00—05	0.6938	0.6204	0.6504	0.7154	0.6263	0.6963	0.7044
红卫农场28队	960002801	0.5337	0.5937	0.6102	0.5448	0.6466	0.5930	0.6094
浓江农场8区	1508	0.4803	0.5543	0.5321	0.5559	0.6330	0.6136	0.6369
青龙山农场17队	1703	0.5337	0.6356	0.7020	0.7881	0.6760	0.6670	0.6826
勤得利农场36队	0436020	0.4803	0.6190	0.6159	0.6981	0.7219	0.6801	0.6478
前锋农场场部	锋—21号	0.4269	0.4347	0.5459	0.6219	0.5438	0.6424	0.5588
洪河农场6区	601	0.6404	0.5930	0.6274	0.5739	0.6638	0.5969	0.6923
二道河农场5区	二—18号	0.2668	0.3375	0.5104	0.5792	0.4843	0.6317	0.4683
大兴农场11队	20	0.3202	0.4269	0.4112	0.5261	0.4102	0.4885	0.4656
胜利农场31队	胜—8号	0.2668	0.3752	0.4315	0.4272	0.4667	0.5070	0.5483
前哨农场12队	12队17号	0.5337	0.4842	0.4631	0.5714	0.5791	0.5927	0.6061

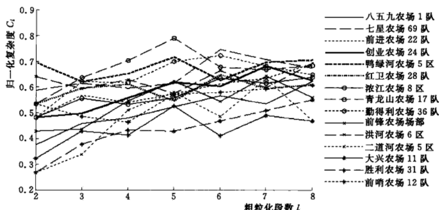


图4-7　各逐月地下水埋深序列归一化复杂度随粗粒化段数的变化曲线

为了评价不同分段数下计算结果的稳定性，需要计算不同粗粒化段数 l 所对应的复杂度序列之间的相关系数。显然，相关系数越大，则其所对应的复杂度指标在反映序列复杂性时稳定性就越好[34]。现计算分段数为 i、j(i、j=2，3，4，5，6，7，8，且 $i \neq j$) 时所得的归一化复杂度序列 C_i 和 C_j 的相关系数 $r(C_i, C_j)$，计算结果见表 4-10。

表 4-10　　不同复杂度序列之间的相关系数矩阵

$r(C_i, C_j)$	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
C_2	1						
C_3	0.8620	1					
C_4	0.7447	0.8155	1				
C_5	0.5639	0.6264	0.8074	1			
C_6	0.7723	0.8879	0.7992	0.5808	1		
C_7	0.6078	0.5850	0.7564	0.7828	0.7260	1	
C_8	0.8400	0.8686	0.7156	0.4985	0.8415	0.5693	1

由表 4-10 可以看出，$r(C_i, C_j)_{max}=r(C_3, C_6)=0.8879$，因此，复杂度序列 C_3 和 C_6 在反映各逐月地下水埋深序列复杂性时稳定性最好。取复杂度序列 C_3 和 C_6 的平均值 $\overline{C}$ 作为各逐月地下水埋深序列复杂性排序指标，结果见表 4-11。

表 4-11　　建三江分局各逐月地下水埋深序列复杂性排序

长观井位置	长观井编号	C_3	复杂性排序	C_6	复杂性排序	$\overline{C}$	复杂性综合排序
八五九农场 1 队	0101	0.4565	⑪	0.5644	⑪	0.5105	⑪
七星农场 69 队	966901	0.6145	④	0.7465	①	0.6805	①
前进农场 22 队	02202—12	0.5661	⑦	0.6110	⑧	0.5886	⑧
创业农场 24 队	08cgj24—20	0.4959	⑨	0.6013	⑨	0.5486	⑨
鸭绿河农场 5 区	00—05	0.6204	②	0.6263	⑦	0.6234	⑤
红卫农场 28 队	960002801	0.5937	⑤	0.6466	⑤	0.6202	⑥
浓江农场 8 区	1508	0.5543	⑧	0.6330	⑥	0.5937	⑦
青龙山农场 17 队	1703	0.6356	①	0.6760	③	0.6558	③
勤得利农场 36 队	0436020	0.6190	③	0.7219	②	0.6705	②
前锋农场场部	锋—21 号	0.4347	⑫	0.5438	⑫	0.4893	⑫
洪河农场 6 区	601	0.5930	⑥	0.6638	④	0.6284	④
二道河农场 5 区	二—18 号	0.3375	⑮	0.4843	⑬	0.4109	⑮
大兴农场 11 队	20	0.4269	⑬	0.4102	⑮	0.4186	⑭
胜利农场 31 队	胜—8 号	0.3752	⑭	0.4667	⑭	0.4210	⑭
前哨农场 12 队	12 队 17 号	0.4842	⑩	0.5791	⑩	0.5317	⑩

由表 4-11 可知，建三江分局各逐月地下水埋深序列的复杂性综合排序为：七星农场 69 队＞勤得利农场 36 队＞青龙山农场 17 队＞洪河农场 6 区＞鸭绿河农场 5 区＞红卫农

场28队＞浓江农场8区＞前进农场22队＞创业农场24队＞前哨农场12队＞八五九农场1队＞前锋农场场部＞胜利农场31队＞大兴农场11队＞二道河农场5区。七星农场69队、勤得利农场36队、青龙山农场17队、洪河农场6区、鸭绿河农场5区及红卫农场28队的$\overline{C}$值均处于0.6～0.7之间，熵值较高，说明这些区域的地下水埋深影响因子较多，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较强；其余监测地点的$\overline{C}$值均处于0.4～0.6之间，熵值较低，说明这些区域的地下水埋深影响因子较少，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较弱。

以各逐月地下水埋深序列作为所在农场代表，计算建三江分局各分区平均复杂度$\overline{C}_{分区}$，见表4-12。由表4-12可以看出，建三江分局逐月地下水埋深序列复杂性北区最高，中区最低，南区居中。北区的$\overline{C}_{分区}$值大于0.6，熵值较高，说明该分区的地下水埋深影响因子较多，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较强；中区和南区的$\overline{C}_{分区}$值均略高于0.5，熵值较低，说明这两个分区的地下水埋深影响因子较少，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较弱。

表4-12　　建三江分局各分区逐月地下水埋深序列平均复杂度

分　区	所 含 农 场	$\overline{C}_{分区}$
北区	青龙山、勤得利、浓江、鸭绿河	0.6359
中区	前进、洪河、前锋、二道河、前哨	0.5298
南区	七星、创业、大兴、红卫、胜利、八五九	0.5332

二、LZC算法在建三江分局季节降水序列复杂性测度中的应用

（一）水文序列小波消噪

实测水文序列在各种因素的干扰下，不可避免地含有系统噪声和测量噪声，噪声掩盖了水文序列的真实变化规律。若采用含有噪声的水文序列进行分析计算，将影响分析成果的精度。因此在分析水文时间序列变化特性之前，应首先对序列进行消噪处理。

1. 小波消噪原理

对于某一实测水文序列$f(t)$，一般由有用序列$v(t)$和噪声序列$n(t)$两部分构成，$v(t)$有助于我们了解水文现象特性，通常表现为低频信号或一些较平稳信号，而$n(t)$则阻碍我们了解和掌握$v(t)$的特性，通常表现为高频信号。不同信号在经过小波变换后会表现出不同的特性，对不同特性的小波分解序列进行处理，再将处理后的序列进行重构，就可以有效地分离高频和低频信号，实现信噪分离[22,35,36]。

2. 小波消噪步骤

目前，小波消噪主要采用20世纪90年代Donoho等人提出的阈值消噪方法[37]。实测水文序列$f(t)=v(t)+n(t)$。设F为$f(t)$的小波变换，则Donoho非线性阈值消噪方法的主要步骤为[22,35,36,38]：

（1）对序列$f(t)$进行N层小波变换，求得F。

（2）采用硬阈值或软阈值处理方法对变换系数进行阈值处理。

（3）计算小波变换的逆变换，进行小波重构，得到消噪序列$v(t)$。

（二）建三江分局季节降水消噪序列复杂性测度

利用 Matlab7.1 中的小波分析工具箱，采用 Db3 正交小波对建三江分局各农场季节降水序列进行 3 次分解，采用 heursure 启发式软阈值方法对小波变换系数进行自动消噪，然后再进行重构，即可得到各农场消噪后季节降水序列 P'_t，见图 4-8。

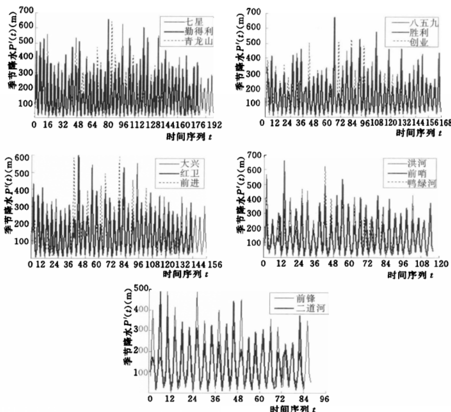


图 4-8　建三江分局各农场季节降水消噪序列变化曲线

取 l=2，3，4，5，6，7，8，分别按照前述的二值粗粒化和多值粗粒化 LZC 算法计算建三江分局各农场季节降水消噪序列的归一化复杂度，计算结果见表 4-13。各农场季节降水消噪序列的归一化复杂度随粗粒化段数的变化如图 4-9 所示。由表 4-13 和图 4-9 可以看出，随着粗粒化段数 l 的增加，各农场季节降水消噪序列的归一化复杂度均表现出增减交替变化的波动特征。

表 4-13　不同粗粒化段数下建三江分局各农场季节降水消噪序列归一化复杂度

农场	样本数	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
七星	200	0.5733	0.5875	0.7852	0.7446	0.7646	0.8035	0.8161
勤得利	184	0.6542	0.8314	0.8437	0.8134	0.8326	0.7876	0.8185
青龙山	148	0.8768	0.7711	0.8489	0.8977	0.8435	0.8659	0.8729

续表

农场	样本数	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
八五九	168	0.7920	0.6554	0.8436	0.8949	0.9067	0.8549	0.7587
胜利	168	0.7480	0.7922	0.7868	0.8586	0.7976	0.8458	0.8105
创业	144	0.5975	0.6697	0.8451	0.8615	0.8136	0.8650	0.7515
大兴	156	0.7939	0.7621	0.9065	0.8728	0.8184	0.8492	0.8304
红卫	144	0.6971	0.7913	0.7847	0.8210	0.8615	0.8782	0.8862
前进	140	0.8148	0.7189	0.8365	0.9039	0.7956	0.8774	0.8761
洪河	104	0.8376	0.8583	0.8174	0.9395	0.7940	0.9481	0.8138
前哨	116	0.8277	0.8294	0.7801	0.8366	0.8047	0.8758	0.8233
鸭绿河	104	0.8376	0.8518	0.8816	0.8727	0.9102	0.8007	0.8325
前锋	88	0.8074	0.8631	0.8304	0.9202	0.8073	0.7343	0.8257
二道河	84	0.8371	0.8213	0.8388	0.8244	0.8360	0.8637	0.7008

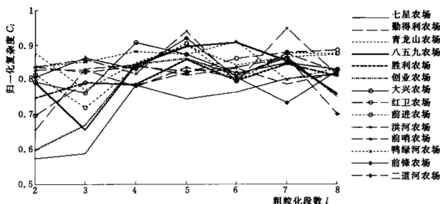


图 4-9　各农场季节降水消噪序列归一化复杂度随粗粒化段数的变化曲线

现计算分段数为 i、j(i、j=2，3，4，5，6，7，8，且 $i \neq j$) 时所得的归一化复杂度序列 C_i 和 C_j 的相关系数 $r(C_i, C_j)$，计算结果见表 4-14。

表 4-14　　不同复杂度序列之间的相关系数矩阵

$r(C_i,C_j)$	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
C_2	1						
C_3	0.5785	1					
C_4	0.2941	0.0905	1				
C_5	0.6715	0.3804	0.3784	1			
C_6	0.3057	0.1496	0.4322	0.1793	1		
C_7	0.2483	−0.0372	−0.1651	0.2464	−0.0800	1	
C_8	0.1213	0.1442	−0.1055	0.1369	−0.0772	−0.0128	1

由表 4-14 可以看出，$r(C_i, C_j)_{max}=r(C_2, C_5)=0.6715$，因此，复杂度序列 C_2 和 C_5 在反映各农场季节降水消噪序列复杂性时稳定性最好。取复杂度序列 C_2 和 C_5 的平均值 $\overline{C}$ 作为各农场季节降水消噪序列复杂性排序指标，结果见表 4-15。

表 4-15　　建三江分局各农场季节降水消噪序列复杂性排序

农　场	C_2	复杂性排序	C_5	复杂性排序	$\overline{C}$	复杂性综合排序
七星	0.5733	⑭	0.7446	⑭	0.6590	⑭
勤得利	0.6542	⑫	0.8134	⑫	0.7338	⑫
青龙山	0.8768	①	0.8977	④	0.8873	②
八五九	0.7920	⑨	0.8949	⑤	0.8435	⑥
胜利	0.7480	⑩	0.8586	⑨	0.8033	⑩
创业	0.5975	⑬	0.8615	⑧	0.7295	⑬
大兴	0.7939	⑧	0.8728	⑥	0.8334	⑦
红卫	0.6971	⑪	0.8210	⑫	0.7591	⑪
前进	0.8148	⑥	0.9039	③	0.8594	④
洪河	0.8376	②	0.9395	①	0.8886	①
前哨	0.8277	⑤	0.8366	⑩	0.8322	⑧
鸭绿河	0.8376	②	0.8727	⑦	0.8552	⑤
前锋	0.8074	⑦	0.9202	②	0.8638	③
二道河	0.8371	④	0.8244	⑪	0.8308	⑨

由表 4-15 可知，建三江分局各农场季节降水消噪序列的复杂性排序为：洪河农场>青龙山农场>前锋农场>前进农场>鸭绿河农场>八五九农场>大兴农场>前哨农场>二道河农场>胜利农场>红卫农场>勤得利农场>创业农场>七星农场。七星农场的 $\overline{C}$ 值小于 0.7，熵值较低，说明该农场的季节降水影响因子较少，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较弱；其余农场的 $\overline{C}$ 值均处于 0.7～0.9 之间，熵值较高，说明这些农场的季节降水影响因子较多，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较强。

根据表 4-15 中各农场季节降水消噪序列 $\overline{C}$ 计算结果，计算建三江分局各分区（北区、中区、南区）平均复杂度 $\overline{C}_{分区}$，见表 4-16。由表 4-16 可以看出，建三江分局季节降水消噪序列复杂性中区最高，南区最低，北区居中。各分区的 $\overline{C}_{分区}$ 值均处于 0.7～0.9 之间，熵值较高，说明各分区的季节降水影响因子较多，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较强。

表 4-16　　建三江分局各分区季节降水消噪序列平均复杂度

分　区	所　含　农　场	$\overline{C}_{分区}$
北区	青龙山、勤得利、鸭绿河	0.8254
中区	前进、洪河、前锋、二道河、前哨	0.8550
南区	七星、创业、大兴、红卫、胜利、八五九	0.7713

第四节 基于分形理论的水文序列复杂性研究

本节尝试采用极差分析分形理论、小波变换分形理论提取分维值，对建三江分局逐月地下水埋深序列与季节降水序列复杂性进行测度分析。

一、极差分析分形理论在水文序列复杂性测度中的应用

（一）基于 R/S 分析法的建三江分局地下水埋深序列分维估计

按照前述方法计算建三江分局各逐月地下水埋深序列的 Hurst 系数的极差估计量 H_R，然后采用式（3-23）计算其分维值，结果见表 4-17。

表 4-17　　建三江分局各逐月地下水埋深序列分维值计算

长观井位置	长观井编号	R_n	H_R	D	排序
八五九农场 1 队	0101	55.4205	0.9583	1.0417	⑭
七星农场 69 队	966901	48.8852	0.9284	1.0716	⑫
前进农场 22 队	02202—12	46.2753	0.9153	1.0847	⑧
创业农场 24 队	08cgj24—20	38.1297	0.8690	1.1310	③
鸭绿河农场 5 区	00—05	38.8954	0.8738	1.1262	④
红卫农场 28 队	960002801	40.9264	0.8859	1.1141	⑥
浓江农场 8 区	1508	40.3450	0.8825	1.1175	⑤
青龙山农场 17 队	1703	31.7120	0.8251	1.1749	①
勤得利农场 36 队	0436020	47.8415	0.9232	1.0768	⑨
前锋农场场部	锋—21 号	48.1425	0.9247	1.0753	⑩
洪河农场 6 区	601	48.5648	0.9268	1.0732	⑪
二道河农场 5 区	二—18 号	44.7827	0.9074	1.0926	⑦
大兴农场 11 队	20	36.5796	0.8591	1.1409	②
胜利农场 31 队	胜—8 号	57.7453	0.9681	1.0319	⑮
前哨农场 12 队	12 队 17 号	54.3736	0.9537	1.0463	⑬

由表 4-17 可知，建三江分局各逐月地下水埋深序列的复杂性综合排序为：青龙山农场 17 队＞大兴农场 11 队＞创业农场 24 队＞鸭绿河农场 5 区＞浓江农场 8 区＞红卫农场 28 队＞二道河农场 5 区＞前进农场 22 队＞勤得利农场 36 队＞前锋农场场部＞洪河农场 6 区＞七星农场 69 队＞前哨农场 12 队＞八五九农场 1 队＞胜利农场 31 队。各监测地点的 H_R 值均处于 0.8～1.0 之间，表明各逐月地下水埋深序列具有长持续性相关结构，未来将保持继续增长的趋势。各监测地点的分维值 D 均略大于 1.0，分维值较低，说明这些区域的地下水埋深影响因子较少，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较弱。

以各逐月地下水埋深序列作为所在农场代表，计算建三江分局各分区平均分维值 $\overline{D}$，见表 4-18。由表 4-18 可以看出，建三江分局逐月地下水埋深序列复杂性北区最高，中区最低，南区居中。各分区的平均分维值 $\overline{D}$ 均略大于 1.0，分维值较低，说明各分区的地



下水埋深影响因子较少，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较弱。

表 4-18　　建三江分局各分区逐月地下水埋深序列平均分维值

分　区	所　含　农　场	$\overline{D}$
北区	青龙山、勤得利、浓江、鸭绿河	1.1239
中区	前进、洪河、前锋、二道河、前哨	1.0744
南区	七星、创业、大兴、红卫、胜利、八五九	1.0885

（二）基于 R/S 分析法的建三江分局季节降水序列分维估计

按照前述方法计算建三江分局各农场季节降水序列的 Hurst 系数的极差估计量 H_R，然后采用式（3-23）计算其分维值，结果见表 4-19。

表 4-19　　建三江分局各农场季节降水序列分维值计算

农　场	样本数	R_n	H_R	D	排　序
七星	200	7.8861	0.4484	1.5516	⑦
勤得利	184	7.2665	0.4386	1.5614	⑤
青龙山	148	7.6417	0.4725	1.5275	⑩
八五九	168	6.6066	0.4261	1.5739	④
胜利	168	6.3882	0.4185	1.5815	②
创业	144	7.6780	0.4766	1.5234	⑫
大兴	156	6.3444	0.4241	1.5759	③
红卫	144	6.8757	0.4508	1.5492	⑨
前进	140	10.3512	0.5501	1.4499	⑭
洪河	104	5.9162	0.4499	1.5501	⑧
前哨	116	6.0047	0.4415	1.5585	⑥
鸭绿河	104	5.0559	0.4101	1.5899	①
前锋	88	6.3667	0.4892	1.5108	⑬
二道河	84	5.8967	0.4747	1.5253	⑪

由表 4-19 可知，建三江分局各农场季节降水序列的复杂性排序为：鸭绿河农场＞胜利农场＞大兴农场＞八五九农场＞勤得利农场＞前哨农场＞七星农场＞洪河农场＞红卫农场＞青龙山农场＞二道河农场＞创业农场＞前锋农场＞前进农场。前进农场的 $H_R>0.5$，表明该农场季节降水序列具有一定长持续性相关结构，未来的变化趋势将与过去一致；其余农场的 H_R 值均小于 0.5，表明这些农场季节降水序列具有一定反持续性相关结构，未来的变化趋势将与过去相反。前进农场的分维值 D 均小于 1.5，分维值较低，说明该农场的季节降水影响因子较少，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较弱；其余农场的分维值 D 均大于 1.5，分维值较高，说明这些农场的季节降水影响因子较多，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较强。

根据表 4-19 中各农场季节降水序列分维计算结果，计算建三江分局各分区（北区、

中区、南区）平均分维值 $\overline{D}$，见表 4-20。由表 4-20 可以看出，建三江分局季节降水序列复杂性北区最高，中区最低，南区居中。各分区的平均分维值 $\overline{D}$ 均大于 1.5，分维值较高，说明各分区的季节降水影响因子较多，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较强。

表 4-20　　建三江分局各分区季节降水序列平均分维值

分　区	所 含 农 场	$\overline{D}$
北区	青龙山、勤得利、鸭绿河	1.5596
中区	前进、洪河、前锋、二道河、前哨	1.5189
南区	七星、创业、大兴、红卫、胜利、八五九	1.5593

二、离散小波变换分形理论在水文序列复杂性测度中的应用

（一）基于 DWT 的建三江分局地下水埋深序列分维估计

采用前述的基于 DWT 的分维估计法，选用 Db4 小波[22,39]，取 $M=5$，分别计算建三江分局各逐月地下水埋深序列的分维值，计算结果见表 4-21。绘制各逐月地下水埋深序列分维小波估计法计算频谱指数 α 的回归直线，如图 4-10 所示。

表 4-21　　基于 DWT 的建三江分局各逐月地下水埋深序列分维值计算

长观井位置	长观井编号	回 归 方 程	频谱指数 α	D	排序
八五九农场 1 队	0101	$y_j=0.8227j-4.1715$，$R^2=0.3921$	0.8227	1.0886	⑭
七星农场 69 队	966901	$y_j=1.0243j-2.8938$，$R^2=0.5252$	1.0243	1.9878	①
前进农场 22 队	02202—12	$y_j=1.2595j-4.8441$，$R^2=0.4820$	1.2595	1.8703	⑧
创业农场 24 队	08cgj24—20	$y_j=0.9409j-1.7633$，$R^2=0.4817$	0.9409	1.0295	⑮
鸭绿河农场 5 区	00—05	$y_j=1.1968j-6.3811$，$R^2=0.8424$	1.1968	1.9016	⑤
红卫农场 28 队	960002801	$y_j=1.1613j-3.6793$，$R^2=0.5672$	1.1613	1.9194	④
浓江农场 8 区	1508	$y_j=1.1285j-2.2486$，$R^2=0.6916$	1.1285	1.9357	②
青龙山农场 17 队	1703	$y_j=1.3909j-5.2152$，$R^2=0.6445$	1.3909	1.8046	⑩
勤得利农场 36 队	0436020	$y_j=0.6222j-6.2727$，$R^2=0.3352$	0.6222	1.1889	⑬
前锋农场场部	锋—21 号	$y_j=1.1287j-6.3683$，$R^2=0.6845$	1.1287	1.9356	③
洪河农场 6 区	601	$y_j=1.2346j-5.1722$，$R^2=0.6091$	1.2346	1.8827	⑦
二道河农场 5 区	二—18 号	$y_j=1.7621j-9.9592$，$R^2=0.9445$	1.7621	1.6189	⑫
大兴农场 11 队	20	$y_j=1.3931j-3.8089$，$R^2=0.5666$	1.3931	1.8035	⑪
胜利农场 31 队	胜—8 号	$y_j=1.2310j-6.9129$，$R^2=0.5790$	1.2310	1.8845	⑥
前哨农场 12 队	12 队 17 号	$y_j=1.2939j-11.0739$，$R^2=0.6820$	1.2939	1.8531	⑨

由表 4-21 可知，建三江分局各逐月地下水埋深序列的复杂性综合排序为：七星农场 69 队＞浓江农场 8 区＞前锋农场场部＞红卫农场 28 队＞鸭绿河农场 5 区＞胜利农场 31 队＞洪河农场 6 区＞前进农场 22 队＞前哨农场 12 队＞青龙山农场 17 队＞大兴农场 11 队＞二道河农场 5 区＞勤得利农场 36 队＞八五九农场 1 队＞创业农场 24 队。

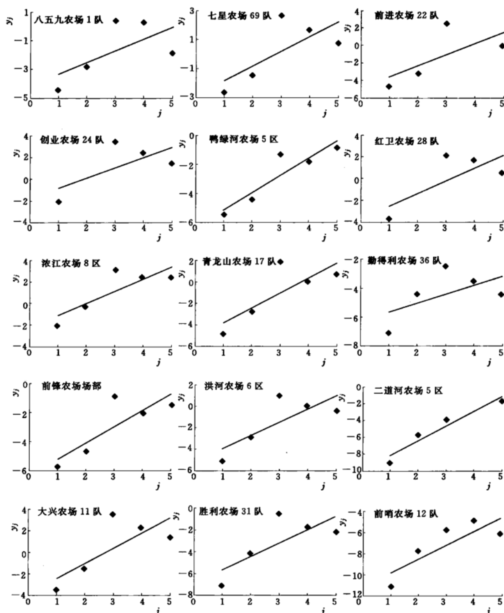


图4-10 建三江分局各逐月地下水埋深序列分维离散小波估计的回归直线

由图4-10可以看出，八五九农场1队、前进农场22队、创业农场24队及勤得利农场36队回归直线拟合效果稍差，经过计算，其回归直线的复相关系数平方（R^2）均小于0.5（见表4-21），回归方程相关性不够显著，所估计的频谱指数稳定性稍差；而其余监测地点回归直线拟合效果较好，经过计算，其回归直线的R^2均大于0.5（见表4-21），

回归方程相关性较为显著，所估计的频谱指数稳定性较好，这种频谱指数稳定性上的差异主要是由于所收集的逐月地下水埋深监测资料序列长度有限所导致的。

由表 4-21 可知，勤得利农场 36 队、八五九农场 1 队及创业农场 24 队的分维值 D 均略大于 1.0，分维值较低，说明这些区域的地下水埋深影响因子较少，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较弱；其余监测地点的分维值 D 均处于 1.6～2.0 之间，分维值较高，说明这些区域的地下水埋深影响因子较多，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较强。

以各逐月地下水埋深序列作为所在农场代表，计算建三江分局各分区平均分维值 $\overline{D}$，见表 4-22。由表 4-22 可以看出，建三江分局逐月地下水埋深序列复杂性中区最高，南区最低，北区居中。各分区的平均分维值 $\overline{D}$ 均处于 1.6～1.9 之间，分维值较高，说明各分区的地下水埋深影响因子较多，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较强。

表 4-22　　建三江分局各分区逐月地下水埋深序列平均分维值

分　区	所　含　农　场	$\overline{D}$
北区	青龙山、勤得利、浓江、鸭绿河	1.7077
中区	前进、洪河、前锋、二道河、前哨	1.8321
南区	七星、创业、大兴、红卫、胜利、八五九	1.6189

（二）基于 DWT 的建三江分局季节降水序列分维估计

采用前述的基于 DWT 的分维估计法，选用 Db5 小波，取 $M=5$，分别计算建三江分局各农场季节降水序列的分维值，计算结果见表 4-23。绘制各农场季节降水序列分维小波估计法计算频谱指数 α 的回归直线，见图 4-11。

表 4-23　　基于 DWT 的建三江分局各农场季节降水序列分维值计算

农　场	样本数	回　归　方　程	频谱指数 α	D	排　序
七星	200	$y_j=-0.5917j+14.7414$，$R^2=0.7891$	−0.5917	1.7958	⑩
勤得利	184	$y_j=-0.3814j+14.8225$，$R^2=0.5960$	−0.3814	1.6907	⑭
青龙山	148	$y_j=-0.5962j+15.0220$，$R^2=0.9821$	−0.5962	1.7981	⑨
八五九	168	$y_j=-0.5966j+14.8143$，$R^2=0.8420$	−0.5966	1.7983	⑧
胜利	168	$y_j=-0.4094j+14.6917$，$R^2=0.7257$	−0.4094	1.7047	⑬
创业	144	$y_j=-0.6239j+14.8244$，$R^2=0.9170$	−0.6239	1.8120	⑥
大兴	156	$y_j=-0.7626j+14.8826$，$R^2=0.9104$	−0.7626	1.8813	④
红卫	144	$y_j=-0.6635j+14.9353$，$R^2=0.8495$	−0.6635	1.8318	⑤
前进	140	$y_j=-0.8325j+15.1604$，$R^2=0.9383$	−0.8325	1.9162	①
洪河	104	$y_j=-0.7716j+15.5400$，$R^2=0.9555$	−0.7716	1.8858	③
前哨	116	$y_j=-0.8196j+15.4090$，$R^2=0.9959$	−0.8196	1.9098	②
鸭绿河	104	$y_j=-0.4679j+14.7631$，$R^2=0.8625$	−0.4679	1.7340	⑫
前锋	88	$y_j=-0.6202j+14.8581$，$R^2=0.9573$	−0.6202	1.8101	⑦
二道河	84	$y_j=-0.4887j+14.6688$，$R^2=0.8383$	−0.4887	1.7444	⑪



由表 4-23 可知，建三江分局各农场季节降水序列的复杂性排序为：前进农场>前哨农场>洪河农场>大兴农场>红卫农场>创业农场>前锋农场>八五九农场>青龙山农场>七星农场>二道河农场>鸭绿河农场>胜利农场>勤得利农场。

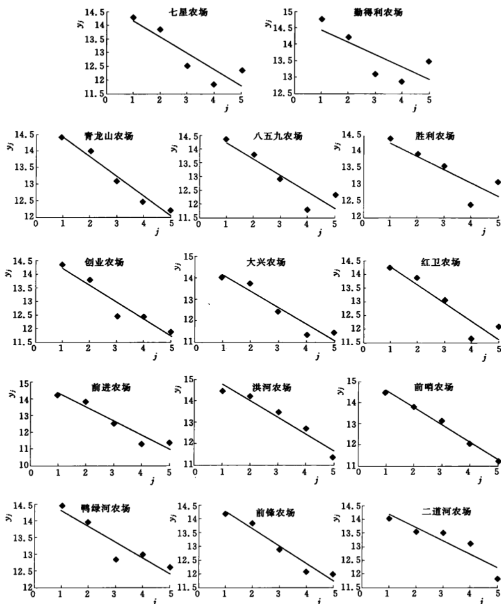


图 4-11　建三江分局各农场季节降水序列分维离散小波估计的回归直线

由图 4-11 可以看出，除了勤得利农场回归直线拟合效果稍差之外，其余农场拟合效果均较好。经过计算，除了勤得利农场回归直线的复相关系数平方（R^2）均小于 0.6 之

外，其余农场回归直线的 R^2 均大于 0.7（见表 4－23），说明回归分析结果较好，回归方程相关性比较显著，从而保证了所估计频谱指数 α 的稳健性及复杂性分析结果的准确性。

由表 4－23 可知，各农场的分维值 D 均处于 1.6～2.0 之间，分维值较高，说明这些农场的季节降水影响因子较多，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较强。

根据表 4－23 中各农场季节降水序列分维计算结果，计算建三江分局各分区（北区、中区、南区）平均分维值 $\overline{D}$，见表 4－24。由表 4－24 可以看出，建三江分局季节降水序列复杂性中区最高，北区最低，南区居中。各分区的平均分维值 $\overline{D}$ 均处于 1.7～1.9 之间，分维值较高，说明各分区的季节降水影响因子较多，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较强。

表 4－24　建三江分局各分区季节降水序列平均分维值

分　区	所　含　农　场	$\overline{D}$
北区	青龙山、勤得利、鸭绿河	1.7409
中区	前进、洪河、前锋、二道河、前哨	1.8533
南区	七星、创业、大兴、红卫、胜利、八五九	1.8040

三、连续小波变换分形理论在水文序列复杂性测度中的应用

（一）基于 CWT 的建三江分局地下水埋深序列分维估计

采用前述的基于 CWT 的分维估计法，选用 Db4 小波，分别计算建三江分局各逐月地下水埋深序列的分维值，计算结果见表 4－25。绘制各逐月地下水埋深序列分维小波估计法计算频谱指数 α 的回归直线，见图 4－12。

表 4－25　建三江分局各逐月地下水埋深序列分维值计算

长观井位置	长观井编号	回　归　方　程	频谱指数 α	H	D	排序
八五九农场 1 队	0101	$\lg y_j=1.7554\lg a_j-1.6240$，$R^2=0.9727$	1.7554	0.3777	1.6223	⑦
七星农场 69 队	966901	$\lg y_j=1.6562\lg a_j-1.1453$，$R^2=0.9531$	1.6562	0.3281	1.6719	③
前进农场 22 队	02202—12	$\lg y_j=1.7051\lg a_j-1.1606$，$R^2=0.9698$	1.7051	0.3526	1.6474	⑤
创业农场 24 队	08cgj24—20	$\lg y_j=1.6383\lg a_j-0.7670$，$R^2=0.9640$	1.6383	0.3191	1.6809	②
鸭绿河农场 5 区	00—05	$\lg y_j=1.8324\lg a_j-1.5191$，$R^2=0.9916$	1.8324	0.4162	1.5838	⑩
红卫农场 28 队	960002801	$\lg y_j=1.7772\lg a_j-1.0604$，$R^2=0.9849$	1.7772	0.3886	1.6114	⑨
浓江农场 8 区	1508	$\lg y_j=1.5419\lg a_j-0.8482$，$R^2=0.9514$	1.5419	0.2709	1.7291	①
青龙山农场 17 队	1703	$\lg y_j=1.7195\lg a_j-1.2769$，$R^2=0.9708$	1.7195	0.3598	1.6402	⑥
勤得利农场 36 队	0436020	$\lg y_j=1.9335\lg a_j-1.2601$，$R^2=0.9952$	1.9335	0.4667	1.5333	⑮
前锋农场场部	锋—21 号	$\lg y_j=1.8810\lg a_j-1.4346$，$R^2=0.9943$	1.8810	0.4405	1.5595	⑪
洪河农场 6 区	601	$\lg y_j=1.7674\lg a_j-1.3156$，$R^2=0.9881$	1.7674	0.3837	1.6163	⑧
二道河农场 5 区	二—18 号	$\lg y_j=1.9137\lg a_j-1.3850$，$R^2=0.9931$	1.9137	0.4569	1.5431	⑬
大兴农场 11 队	20	$\lg y_j=1.6855\lg a_j-1.1768$，$R^2=0.9253$	1.6855	0.3427	1.6573	④
胜利农场 31 队	胜—8 号	$\lg y_j=1.8855\lg a_j-1.1691$，$R^2=0.9939$	1.8855	0.4428	1.5572	⑫
前哨农场 12 队	12 队 17 号	$\lg y_j=1.9186\lg a_j-1.3590$，$R^2=0.9947$	1.9186	0.4593	1.5407	⑭

由表 4-25 可知，建三江分局各逐月地下水埋深序列的复杂性综合排序为：浓江农场 8 区＞创业农场 24 队＞七星农场 69 队＞大兴农场 11 队＞前进农场 22 队＞青龙山农场 17 队＞八五九农场 1 队＞洪河农场 6 区＞红卫农场 28 队＞鸭绿河农场 5 区＞前锋农场场部＞胜利农场 31 队＞二道河农场 5 区＞前哨农场 12 队＞勤得利农场 36 队。

由图 4-12 可以看出，各监测地点回归直线拟合效果较好，经过计算，其回归直线的

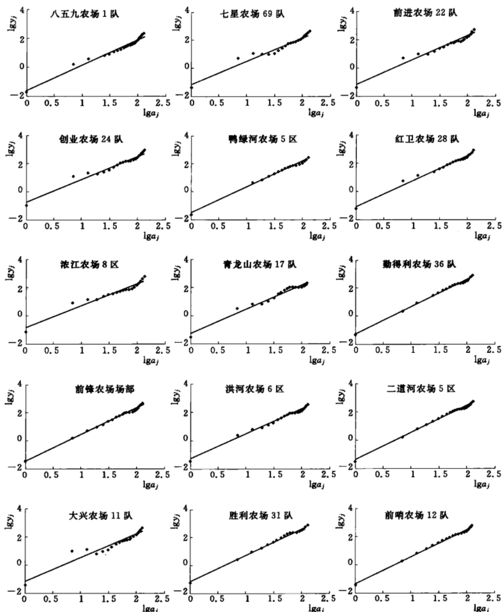


图 4-12 建三江分局各地下水埋深序列分维连续小波估计的回归直线

复相关系数平方（R^2）均大于0.9（见表4-25），说明回归分析结果较好，回归方程相关性比较显著，从而保证了所估计频谱指数α的稳健性及复杂性分析结果的准确性。

由表4-25可知，各监测地点的分维值D均处于1.5～2.0之间，分维值较高，说明这些区域的地下水埋深影响因子较多，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较强。

以各逐月地下水埋深序列作为所在农场代表，计算建三江分局各分区平均分维值$\overline{D}$，见表4-26。由表4-26可以看出，建三江分局逐月地下水埋深序列复杂性南区最高，中区最低，北区居中。各分区的平均分维值$\overline{D}$均处于1.5～1.7之间，分维值较高，说明各分区的地下水埋深影响因子较多，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较强。

表4-26　　建三江分局各分区逐月地下水埋深序列平均分维值

分　区	所　含　农　场	$\overline{D}$
北区	青龙山、勤得利、浓江、鸭绿河	1.6216
中区	前进、洪河、前锋、二道河、前哨	1.5814
南区	七星、创业、大兴、红卫、胜利、八五九	1.6335

（二）基于CWT的建三江分局季节降水序列分维估计

采用前述的基于CWT的分维估计法，选用Db5小波，分别计算建三江分局各农场季节降水序列的分维值，计算结果见表4-27。绘制各农场季节降水序列分维小波估计法计算频谱指数α的回归直线，见图4-13。

表4-27　　基于CWT的建三江分局各农场季节降水序列分维值计算

农　场	样本数	回　归　方　程	频谱指数α	H	D	排序
七星	200	$\lg y_j=1.0134\lg a_j+2.6176$，$R^2=0.8825$	1.0134	0.0067	1.9933	②
勤得利	184	$\lg y_j=0.9983\lg a_j+2.7479$，$R^2=0.8644$	0.9983	0.9991	1.0009	⑭
青龙山	148	$\lg y_j=0.9675\lg a_j+2.7368$，$R^2=0.8197$	0.9675	0.9838	1.0162	⑨
八五九	168	$\lg y_j=1.0283\lg a_j+2.6452$，$R^2=0.8592$	1.0283	0.0141	1.9859	④
胜利	168	$\lg y_j=0.9810\lg a_j+2.7311$，$R^2=0.8565$	0.9810	0.9905	1.0095	⑬
创业	144	$\lg y_j=1.0067\lg a_j+2.5846$，$R^2=0.7932$	1.0067	0.0034	1.9966	①
大兴	156	$\lg y_j=1.0232\lg a_j+2.5827$，$R^2=0.8594$	1.0232	0.0116	1.9884	③
红卫	144	$\lg y_j=0.9789\lg a_j+2.6525$，$R^2=0.8090$	0.9789	0.9894	1.0106	⑪
前进	140	$\lg y_j=1.0521\lg a_j+2.4955$，$R^2=0.6712$	1.0521	0.0260	1.9740	⑤
洪河	104	$\lg y_j=0.9103\lg a_j+2.8327$，$R^2=0.7738$	0.9103	0.9551	1.0449	⑥
前哨	116	$\lg y_j=0.9806\lg a_j+2.7998$，$R^2=0.8577$	0.9806	0.9903	1.0097	⑫
鸭绿河	104	$\lg y_j=0.9728\lg a_j+2.7649$，$R^2=0.7970$	0.9728	0.9864	1.0136	⑩
前锋	88	$\lg y_j=0.9563\lg a_j+2.7917$，$R^2=0.8282$	0.9563	0.9782	1.0218	⑧
二道河	84	$\lg y_j=0.9546\lg a_j+2.7723$，$R^2=0.9005$	0.9546	0.9773	1.0227	⑦

由表4-27可知，建三江分局各农场季节降水序列的复杂性排序为：创业农场＞七星农场＞大兴农场＞八五九农场＞前进农场＞洪河农场＞二道河农场＞前锋农场＞青龙山农

场>鸭绿河农场>红卫农场>前哨农场>胜利农场>勤得利农场。

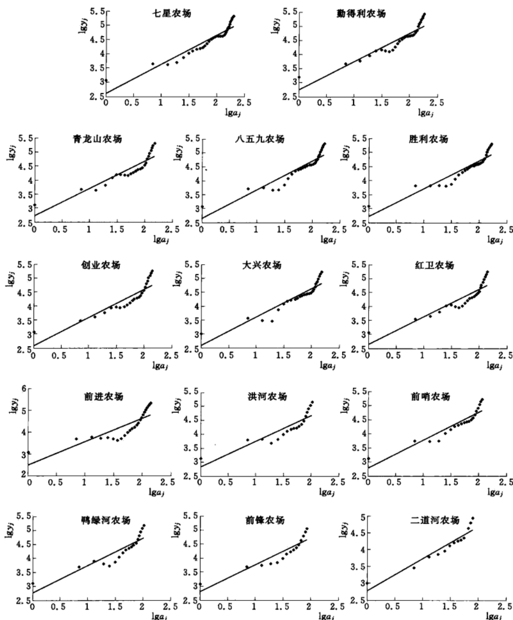


图 4-13 建三江分局各农场季节降水序列分维连续小波估计的回归直线

由图 4-13 可以看出，各农场回归直线拟合效果较好，经过计算，其回归直线的复相关系数平方（R^2）均大于 0.6（见表 4-27），说明回归分析结果较好，回归方程相关性比较显著，从而保证了所估计频谱指数 α 的稳健性及复杂性分析结果的准确性。

由表 4-27 可知，创业农场、七星农场、大兴农场、八五九农场及前进农场的分维值 D 均处于 1.9～2.0 之间，分维值较高，说明这些农场的季节降水影响因子较多，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较强；其余农场的分维值 D 均处于 1.0～1.1 之间，分维值较低，说明该农场的季节降水影响因子较少，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较弱。

根据表 4-27 中各农场季节降水序列分维计算结果，计算建三江分局各分区（北区、中区、南区）平均分维值 $\overline{D}$，见表 4-28。由表 4-28 可以看出，建三江分局各分区季节降水序列复杂性具有由北向南逐渐增加的总体趋势。北区、中区的平均分维值 $\overline{D}$ 均处于 1.0～1.3 之间，分维值较低，说明这两个分区的季节降水影响因子较少，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较弱；南区的平均分维值 $\overline{D}$ 大于 1.6，分维值较高，说明该分区的季节降水影响因子较多，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较强。

表 4-28　　建三江分局各分区季节降水序列平均分维值

分　区	所　含　农　场	$\overline{D}$
北区	青龙山、勤得利、鸭绿河	1.0102
中区	前进、洪河、前锋、二道河、前哨	1.2146
南区	七星、创业、大兴、红卫、胜利、八五九	1.6641

第五节　建三江分局水文序列复杂性综合测度分析

一、水文时间序列复杂性测度方法分析

基于小波变换的信息量系数是水文时间序列复杂性的一种有效测度方法[40]；近似熵可以用较少的样本数（$n=100\sim5000$）得到水文时间序列较为稳定的复杂性测度值[41]；序列长度对 Lempel-Ziv 复杂度算法影响较大，当序列长度不够时，会影响水文时间序列复杂性分析结果的可靠性[42,43]；基于极差分析法的水文时间序列分维估计对序列长度较为敏感，属于有偏估计，稳定性较差[44-46]；虽然基于小波变换的水文序列分维估计值具有无偏性和有效性[47]，但许多研究都表明，序列长度对分维估计具有一定的影响[48-51]，前述基于离散小波变换的地下水埋深序列分维估计值精度稍差刚好说明了这一点。

二、地下水埋深序列复杂性综合测度分析

根据上述分析，确定上述 6 种复杂性测度方法的权重 $w_i(i=1,2,\cdots,6)$（见表 4-29）。将上述各种方法所得到的建三江分局各逐月地下水埋深序列复杂性排序结果（①～⑮）分别赋以相应的分值 $s_i=1\sim15$，即可得到各逐月地下水埋深序列综合复杂度指数计算公式：

$$C_{Ij}=\sum_{i=1}^{6}s_iw_i \tag{4-1}$$

式中：C_{lj}为第j个地下水埋深序列的综合复杂度指数，$j=1$，2，…，15。

按式（4－1）计算建三江分局各逐月地下水埋深序列综合复杂度指数，结果见表4－29。

表4－29　　建三江分局各逐月地下水埋深序列综合复杂度指数计算

长观井位置	WT－ICF (0.16)		ApEn (0.16)		LZC (0.16)		D						C_{lj}	复杂性排序
							R/S分析法 (0.12)		小波估计法					
									DWT(0.16)		DWT(0.24)			
	排序	分值	排序	分值	排序	分值	排序	分值	排序	分值	排序	分值		
八五九农场1队	③	13	⑤	11	⑪	5	⑭	2	⑭	2	⑦	9	7.36	⑩
七星农场69队	⑨	7	①	15	①	15	⑫	4	①	15	③	13	11.92	①
前进农场22队	⑭	2	③	13	⑧	8	⑧	8	⑧	8	⑤	11	8.56	⑦
创业农场24队	⑫	4	②	14	⑨	7	③	13	⑮	1	②	14	9.08	⑥
鸭绿河农场5区	④	12	⑨	7	⑤	11	④	12	⑤	11	⑩	6	9.44	④
红卫农场28队	⑬	3	⑪	5	⑥	10	⑥	10	④	12	⑨	7	7.68	⑨
浓江农场8区	⑦	9	⑫	4	⑦	9	⑤	11	②	14	①	15	10.68	②
青龙山农场17队	⑧	8	⑧	8	③	13	①	15	⑩	6	⑥	10	9.80	③
勤得利农场36队	⑤	11	⑩	6	②	14	⑨	7	⑬	3	⑮	1	6.52	⑪
前锋农场场部	②	14	⑥	10	⑫	4	⑩	6	③	13	⑪	5	8.48	⑧
洪河农场6区	⑥	10	④	12	④	12	⑪	5	⑦	9	⑧	8	9.40	⑤
二道河农场5区	⑪	5	⑮	1	⑮	1	⑦	9	⑫	4	⑬	3	3.56	⑮
大兴农场11队	⑮	1	⑭	2	⑭	2	②	14	⑪	5	④	12	6.16	⑫
胜利农场31队	⑩	6	⑦	9	⑬	3	⑮	1	⑥	10	⑫	4	5.56	⑭
前哨农场12队	①	15	⑬	3	⑩	6	⑬	3	⑨	7	⑭	2	5.80	⑬

注　括号中为地下水埋深序列复杂性测度方法权重。

由表4－29可知，建三江分局各逐月地下水埋深序列的复杂性综合排序为：七星农场69队＞浓江农场8区＞青龙山农场17队＞鸭绿河农场5区＞洪河农场6区＞创业农场24队＞前进农场22队＞前锋农场场部＞红卫农场28队＞八五九农场1队＞勤得利农场36队＞大兴农场11队＞前哨农场12队＞胜利农场31队＞二道河农场5区。八五九农场1队、勤得利农场36队、大兴农场11队、前哨农场12队、胜利农场31队及二道河农场5区的C_{lj}值均处于3～7.5之间，综合复杂度指数较低，说明这些区域的地下水埋深影响因子较少，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较弱；其余监测地点的C_{lj}值均处于7.5～12之间，综合复杂度指数较高，说明这些区域的地下水埋深影响因子较多，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较强。

以各逐月地下水埋深序列作为所在农场代表，计算建三江分局各分区平均综合复杂度指数$\overline{C}_{lj}$，见表4－30。由表4－30可以看出，建三江分局逐月地下水埋深序列复杂性北区最高，中区最低，南区居中。中区的$\overline{C}_{lj}$值小于7.5，综合复杂度指数较低，说明该分区的地下水埋深影响因子较少，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较弱；北区和南区的

$\overline{C}_{lj}$值均处于7.5～10之间，综合复杂度指数较高，说明这两个分区的地下水埋深影响因子较多，相关的地下水系统动力学结构复杂性相对较强。

表4-30　　建三江分局各分区逐月地下水埋深序列平均综合复杂度指数

分　区	所　含　农　场	$\overline{C}_{lj}$
北区	青龙山、勤得利、浓江、鸭绿河	9.11
中区	前进、洪河、前锋、二道河、前哨	7.16
南区	七星、创业、大兴、红卫、胜利、八五九	7.96

根据八五九农场1队（1997～2008年）、七星农场69队（1996～2008年）、前进农场22队（1995～2008年）、创业农场24队（1993～2009年）、鸭绿河农场5区（1997～2009年）、红卫农场28队（1995～2009年）、浓江农场8区（1996～2009年）、青龙山农场17队（1995～2009年）、勤得利农场36队（2000～2009年）、前锋农场场部（1996～2009年）、洪河农场6区（1997～2009年）、二道河农场5区（2000～2009年）、大兴农场11队（1998～2009年）、胜利农场31队（1993～2009年）及前哨农场12队（2004～2009年）的水稻种植面积资料绘制曲线（见图4-14），进一步计算随着年份的增加，各地下水埋深监测地点水田面积的变幅，如图4-15所示。

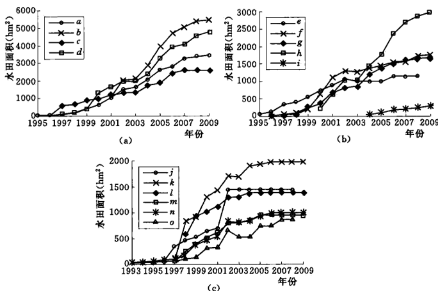


图4-14　建三江分局各地下水埋深监测地点水田面积变化曲线

(a) 北区；(b) 中区；(c) 南区

a—青龙山农场17队；*b*—勤得利农场36队；*c*—浓江农场8区；*d*—鸭绿河农场5区；*e*—前进农场22队；*f*—洪河农场6区；*g*—前锋农场场部；*h*—二道河农场5区；*i*—前哨农场12队；*j*—七星农场69队；*k*—创业农场24队；*l*—大兴农场11队；*m*—红卫农场28队；*n*—胜利农场31队；*o*—八五九农场1队

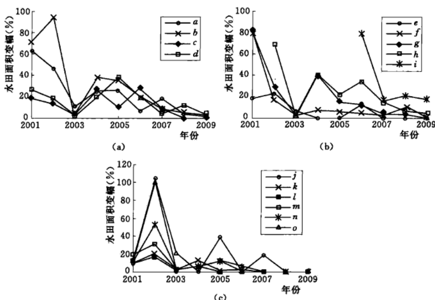


图 4-15　建三江分局各地下水埋深监测地点水田面积变幅变化曲线

(a) 北区；(b) 中区；(c) 南区

a—青龙山农场 17 队；b—勤得利农场 36 队；c—浓江农场 8 区；d—鸭绿河农场 5 区；

e—前进农场 22 队；f—洪河农场 6 区；g—前锋农场场部；h—二道河农场 5 区；

i—前哨农场 12 队；j—七星农场 69 队；k—创业农场 24 队；l—大兴农场 11 队；

m—红卫农场 28 队；n—胜利农场 31 队；o—八五九农场 1 队

由图 4-14（a）和图 4-15（a）可以看出，建三江分局北区各地下水埋深监测地点水田面积最大且逐年增长，水田面积变幅波动最强，因此导致地下水埋深序列复杂性最高；由图 4-14（b）和图 4-15（b）可以看出，建三江分局中区各地下水埋深监测地点水田面积及其变幅变化居中，但可能是由于当地气候条件及地下水补给条件的叠加影响，因此导致地下水埋深序列复杂性最低；由图 4-14（c）和图 4-15（c）可以看出，建三江分局南区各地下水埋深监测地点水田面积最小，七星农场 69 队水田面积 2002 年就达到历史最高值（1433.33hm^2），大兴农场 11 队水田面积 2004 年就达到历史最高值（1380hm^2），红卫农场 28 队水田面积 2005 年就达到历史最高值（946.67hm^2），胜利农场 31 队水田面积 2006 年就达到历史最高值（993.33hm^2），八五九农场 1 队水田面积虽然始终处于增长态势，但据调查，全省最大的提水灌溉工程——八五九农场乌苏里江灌区工程已于 2005 年正式投入使用，当年即有 2000hm^2 水田实现江水灌溉，目前，八五九农场 2.07 万 hm^2 水田已经全部采用地表水灌溉，有效地涵养了地下水源，因此，建三江分局南区各地下水埋深监测地点水田面积变幅波动最弱，但可能是由于当地气候变化较剧烈及地下水补给条件较差，导致地下水埋深序列复杂性居中。

由上述分析可知，当地地下水埋深动态变化最主要的影响因素就是人类的农业生产活动，其次才是当地的气候条件和水文地质条件。

三、季节降水序列复杂性综合测度分析

由前述基于 DWT 和 CWT 的建三江分局各农场季节降水序列分维估计结果可知，两种复杂性测度方法精度相当，再结合前述水文时间序列复杂性测度方法相关分析，确定上述 6 种复杂性测度方法的权重 $w_i(i=1, 2, \cdots, 6)$（见表 4-31）。将上述各种方法所得到建三江分局各农场季节降水序列复杂性排序结果（①～⑭）分别赋以相应的分值 $s_i=14\sim1$，即可按式（4-1）计算各农场季节降水序列的综合复杂度指数 C_{Ij}，结果见表 4-31。

表 4-31　　　　建三江分局各农场季节降水序列综合复杂度指数计算

农　场	WT－ICF (0.16)		ApEn (0.16)		LZC (0.16)		D						C_{Ij}	复杂性排序
							R/S 分析法 (0.12)		小波估计法					
									DWT(0.20)		CWT(0.20)			
	排序	分值	排序	分值	排序	分值	排序	分值	排序	分值	排序	分值		
七星	⑥	9	⑥	9	⑭	1	⑦	8	⑩	5	②	13	7.60	⑧
勤得利	⑤	10	④	11	⑫	3	⑤	10	⑭	1	⑭	1	5.44	⑫
青龙山	①	14	③	12	②	13	⑩	5	⑨	6	⑨	6	9.24	③
八五九	⑧	7	①	14	⑥	9	④	11	⑧	7	④	11	9.72	②
胜利	⑩	5	⑧	7	⑩	5	②	13	⑬	2	⑬	2	5.08	⑬
创业	②	13	⑫	3	⑬	2	⑫	3	⑥	9	①	14	7.84	⑥
大兴	⑨	6	⑪	4	⑦	8	③	12	④	11	③	12	8.92	④
红卫	④	11	⑦	8	⑪	4	⑨	6	⑤	10	⑪	4	7.20	⑨
前进	③	12	②	13	④	11	⑭	1	①	14	⑤	10	10.68	①
洪河	⑬	2	⑩	5	①	14	⑧	7	③	12	⑥	9	8.40	⑤
前哨	⑪	4	⑤	10	⑧	7	⑥	9	②	13	⑫	3	7.64	⑦
鸭绿河	⑦	8	⑨	6	⑤	10	①	14	⑫	3	⑩	5	7.12	⑩
前锋	⑫	3	⑬	2	③	12	⑬	2	⑦	8	⑧	7	5.96	⑪
二道河	⑭	1	⑭	1	⑨	6	⑪	4	⑪	4	⑦	8	4.16	⑭

注　括号中为地下水埋深序列复杂性测度方法权重。

由表 4-31 可知，建三江分局各农场季节降水序列的复杂性排序为：前进农场＞八五九农场＞青龙山农场＞大兴农场＞洪河农场＞创业农场＞前哨农场＞七星农场＞红卫农场＞鸭绿河农场＞前锋农场＞勤得利农场＞胜利农场＞二道河农场。前锋农场、勤得利农场、胜利农场及二道河农场的 C_{Ij} 值均处于 4～6 之间，综合复杂度指数较低，说明这四个农场的季节降水影响因子较少，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较弱；其余农场的 C_{Ij} 值均处于 7～11 之间，综合复杂度指数较高，说明这些农场的季节降水影响因子较多，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较强。

根据表 4-31 中各农场季节降水序列综合复杂度指数计算结果，计算建三江分局各分区（北区、中区、南区）平均综合复杂度指数 $\overline{C_{Ij}}$，见表 4-32。由表 4-32 可以看出，建三江分局各分区季节降水序列复杂性具有由北向南逐渐增加的总体趋势。各分区的 $\overline{C_{Ij}}$ 值

均处于 7～8 之间，综合复杂度指数较高，说明这些农场的季节降水影响因子较多，相关的降水系统动力学结构复杂性相对较强。

表 4-32　建三江分局各分区季节降水序列平均综合复杂度指数

分　区	所　含　农　场	$\overline{C}_{lj}$
北区	青龙山、勤得利、鸭绿河	7.27
中区	前进、洪河、前锋、二道河、前哨	7.37
南区	七星、创业、大兴、红卫、胜利、八五九	7.73

建三江分局区内地势由西南向东北倾斜[52,53]，因此，由东北向西南，随着海拔的逐渐升高，降雨日数与降雨量逐渐增大[11,12,54]，增加了季节降水不均匀分布的几率，这是导致建三江分局各分区季节降水序列复杂性具有由北向南逐渐增加变化特征的原因之一。几十年来，为了保障国家的粮食安全，建三江分局对沼泽湿地和草甸湿地进行了大规模的农业开垦[55,56]，1976～2005 年，建三江分局的沼泽湿地面积由 658366hm^2 减小到 201291hm^2，减少了 69.4%；草甸湿地面积由 331374hm^2 减小到 4863hm^2，减少了 98.5%，几乎开发殆尽；旱田面积由 459253hm^2 增加到 822237hm^2，增长了 79.0%；水田面积由 47hm^2 增加到 246133hm^2，增长了 5236 倍[57]。湿地农田化过程[58]改变了下垫面状况，进而影响到当地季节降水的分布[14]。从历年《建三江农垦统计年鉴》中收集到建三江分局 1992～2010 年各农场耕地面积资料。由于在所收集的序列资料中，缺失各农场 1996～1998 年及 2002 年的耕地面积数据，所以首先采用三次样条插值[24]对缺失的数据进行插值，然后计算建三江分局各分区历年耕地面积，绘制变化曲线，见图 4-16。进一步计算随着年份的增加，各分区耕地面积的变幅，如图 4-17 所示。

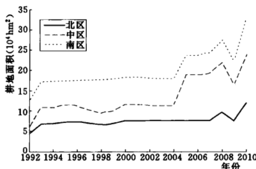


图 4-16　建三江分局各分区耕地面积变化曲线

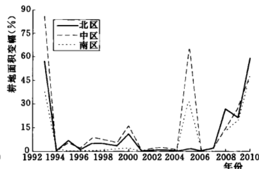


图 4-17　建三江分局各分区耕地面积变幅变化曲线

由图 4-16 和图 4-17 可以看出，建三江分局各分区耕地面积及其变幅变化特征基本一致，各分区耕地面积呈逐年增长的总体态势。但 1992～2010 年，建三江分局北区耕地面积由 43745hm^2 增加到 120827hm^2，平均年增幅为 4282.3hm^2，在三个分区中平均年增幅最小，对下垫面影响最小，因此导致北区季节降水序列复杂性最低；建三江分局南区耕地面积由 124421hm^2 增加到 328933hm^2，平均年增幅为 11361.8hm^2，在三个分区中平均

年增幅最大，对下垫面影响最大，因此导致南区季节降水序列复杂性最高；建三江分局中区耕地面积由58487hm² 增加到 241620hm²，平均年增幅为 10174.1hm²，在三个分区中平均年增幅居中，对下垫面影响居中，因此导致中区季节降水序列复杂性居中。

由上述分析可知，建三江分局季节降水的动态变化主要受当地地形及人类活动（农业开发）的影响。

参 考 文 献

[1] 王国利，梁国华．地下水系统决策的时序多层次多目标模糊优选模型与应用［J］．水文，2009，29（6）：24－27.

[2] 田光忠．昌平区地下水位动态研究及效果［J］．北京水务，2007（5）：44－47.

[3] 刘敏，黄领梅，沈冰，等．和田绿洲地下水埋深的自然影响因素分析［J］．中国生态农业学报，2009，17（1）：174－177.

[4] 刘晓冉，杨茜，程炳岩，等．近46年重庆地区降水资源的变化特征分析［J］．西南大学学报（自然科学版），2010，32（7）：93－100.

[5] 李占杰，鱼京善．黄河流域降水要素的周期特征分析［J］．北京师范大学学报（自然科学版），2010，46（3）：401－404.

[6] 魏一鸣，孙国栋，胡平昭，等．九江年降水时间序列的混沌特性［J］．江西科学，1998，16（3）：141－145.

[7] 门宝辉，赵燮京，梁川．长江上游川中地区降水时间序列的混沌分析［J］．长江科学院院报，2004，21（1）：43－46.

[8] 石教智，陈晓宏，林汝颜．东江流域降水时间序列的混沌特征分析［J］．中山大学学报（自然科学版），2006，45（4）：111－115.

[9] 孟菲，康建成，王甜甜，等．上海市近百年来夏季降水时空分布特征及影响因素［J］．气象与环境科学，2007，30（3）：14－19.

[10] 梁洁仪，贺海晏．登陆台风路径与降水分析［J］．中山大学研究生学刊（自然科学、医学版），2006，26（1）：76－81.

[11] 李岩瑛，张强，许霞，等．祁连山及周边地区降水与地形的关系［J］．冰川冻土，2010，32（1）：52－61.

[12] 陈乾，陈添宇，肖宏斌．祁连山区夏季降水过程天气分析［J］．气象科技，2010，38（1）：26－31.

[13] 舒守娟，王元，熊安元．中国区域地理、地形因子对降水分布影响的估算和分析［J］．地球物理学报，2007，50（6）：1703－1712.

[14] 刘茂云．影响降水的因素分析［J］．科学咨询（决策管理），2007（11）：15.

[15] 王文圣，黄伟军，丁晶．基于小波消噪和符号动力学的径流变化复杂性研究［J］．水科学进展，2005，16（3）：380－383.

[16] 蒋艳，夏军．塔里木河流域径流变化特征及其对气候变化的响应［J］．资源科学，2007，29（3）：45－52.

[17] 袁鹏，李谓新，王文圣，等．月降雨量时间序列中的混沌现象［J］．四川大学学报（工程科学版），2002，34（1）：16－19.

[18] 王德智，夏军，张利平．东北地区月降雨时间序列的混沌特性研究［J］．水电能源科学，2002，20（3）：32－34.

[19] 于延胜，陈兴伟．福州市区降雨序列多时间尺度的混沌特征［J］．福建师范大学学报（自然科学



版），2008，24（5）：96－100.
[20] 牟丽琴，林焕新．汀江流域降水径流时间序列的混沌分析［J］．人民珠江，2010（1）：27－29，55.
[21] Dhanya C T，Kumar D N. Nonlinear ensemble prediction of chaotic daily rainfall［J］. Advances in Water Resources，2010，33（3）：327－347.
[22] 王文圣，丁晶，李跃清．水文小波分析［M］．北京：化学工业出版社，2005.
[23] 吴彤．"复杂性"研究的若干哲学问题［J］．自然辩证法研究，2000，16（1）：6－10.
[24] 张桥艳，孙宏，景崇毅，等．不同航班时段的收益贡献率分析［J］．交通运输工程与信息学报，2010，8（3）：105－109.
[25] 袁礼海，宋建社．小波变换中的信号边界延拓方法研究［J］．计算机应用研究，2006（3）：25－27.
[26] 张鹏．基于小波理论的白鹤隧道围岩稳定性非线性研究［D］．长春：吉林大学，2009.
[27] 张岱固．基于混沌密码学的 JPEG2000 数字图像加密算法研究［D］．重庆：重庆大学，2008.
[28] 王杰，吴国曾，朱晓东．实时录井信号小波分析中的右边界动态处理［J］．郑州大学学报（理学版），2010，42（3）：84－89.
[29] 郭品文，居丽丽，徐同．非线性主成分分析在中国四季降水异常分布中的应用［J］．南京气象学院学报，2008，31（4）：460－467.
[30] 高锋，王宝书．全球变暖与东北地区气温变化研究［J］．海洋预报，2008，25（1）：25－30.
[31] 吴伟，王式功，邓莲堂，等．中国北方云量的四季分布与降水［J］．兰州大学学报（自然科学版），2010，46（6）：32－40.
[32] 董满宇，江源，任斐鹏，等．近 50 年来北方农牧交错带气温变化趋势及突变分析［J］．中国沙漠，2010，30（4）：926－932.
[33] 齐子元，徐章遂，卢志才．近似熵在发动机故障诊断中的应用研究［J］．军械工程学院学报，2008，20（2）：39－42.
[34] 张佃中，谭小红，王智，等．基于等概率粗粒化的复杂度算法及其应用［J］．系统仿真学报，2008，20（15）：4096－4098，4103.
[35] 刘东，付强．基于小波消噪的三江平原低湿地月降水时间序列分析［J］．水土保持研究，2008，15（2）：164－167，172.
[36] 刘冀，董晓华，李帅．基于小波消噪的径流趋势变化对比分析［J］．水电能源科学，2009，27（5）：4－7.
[37] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding［J］. IEEE Transactions on Information Theory，1995，41（3）：613－627.
[38] 田玉静，左红伟．小波消噪阈值算法优化［J］．声学技术，2009，28（4）：503－506.
[39] 王文圣，向红莲，赵东．水文序列分形维数估计的小波方法［J］．四川大学学报（工程科学版），2005，37（1）：1－4.
[40] 李贤彬，丁晶，李后强．水文时间序列的子波分析法［J］．水科学进展，1999，10（2）：144－149.
[41] 陈晓平，和卫星，姚静．基于小波变换与近似熵的睡眠分期研究［J］．中国组织工程研究与临床康复，2008，12（9）：1701－1704.
[42] 金宁德，董芳，赵舒．气液两相流电导波动信号复杂性测度分析及其流型表征［J］．物理学报，2007，56（2）：720－729.
[43] 沈恩华．脑电的复杂度分析［D］．上海：复旦大学，2004.
[44] 李贤彬，丁晶，李后强．水文序列 Hurst 系数的子波估计［J］．水利学报，1999，30（8）：21－25.



[45] 胡志晖，孙克渠，茆海云，等．连云港水文序列 Hurst 系数的子波估计 [J]．海洋预报，2007，24 (4)：97 - 101.

[46] Rakhshandehroo G R, Shaghaghian M R, Keshavarzi A R, et al. Temporal variation of velocity components in a turbulent open channel flow: Identification of fractal dimensions [J]. Applied Mathematical Modelling, 2009, 33 (10): 3815 - 3824.

[47] Abry P, Veiteh D. Wavelet analysis of long-range-dependence traffic [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1998, 44 (1): 2 - 15.

[48] 毛宁波．测井数据分维计算及其应用条件研究 [J]．地球物理学进展，2000，15 (1)：70 - 77.

[49] 王贵林，李圣怡，戴一帆．光学表面的分形特点与模拟表征算法 [J]．国防科技大学学报，2003，25 (4)：72 - 75.

[50] 符维娟．基因组序列 CGR 图形的多重分形分析及应用 [D]．上海：复旦大学，2005.

[51] 刘彬，王霄，谢平．多重分形在复杂机械系统故障诊断中的应用 [J]．复杂系统与复杂性科学，2005，2 (1)：66 - 70.

[52] 郝婧．建三江旅游资源类型分析 [J]．今日科苑，2009 (2)：50 - 51.

[53] 孙晓春，姚春波，陆守民，等．羊肝片吸虫病的预防和诊治 [J]．畜牧兽医科技信息，2006 (1)：56 - 57.

[54] 黄茂栋，张璞．乌鲁木齐市地理地形因素对降水空间分布的影响 [J]．气象科技，2009，37 (1)：25 - 28.

[55] 郭雷，马克明，张易．三江平原建三江地区 30 年湿地景观退化评价 [J]．生态学报，2009，29 (6)：3126 - 3135.

[56] 包洪福，李一葳．三江平原湿地的生态保护与修复 [J]．环境科学与管理，2010，35 (5)：157 - 159.

[57] 那晓东，张树清，孔博，等．三江平原土地利用/覆被动态变化对洪河保护区湿地植被退化的影响 [J]．干旱区资源与环境，2009，23 (3)：144 - 150.

[58] 孔博，邓伟，陶和平，等．基于多尺度遥感影像分割方法的湿地生态廊道设计 [J]．生态学杂志，2010，29 (2)：407 - 412.



第五章　区域复杂地下水埋深序列发展态势分析

区域地下水埋深受到地下水开发、降水、蒸发、水文地质条件等众多复杂因素的影响[1]，其动态变化是一个复杂的非平稳随机水文过程[2]。地下水埋深精确预测是区域地下水资源科学管理的前提。要对地下水埋深进行准确预测是非常困难的，传统的地下水埋深预测方法有时间序列分析[3]、灰色理论[4]、人工神经网络[5,6]、多元线性回归、季节分解模型[7]、自记忆模型[8]等，这些方法有的以线性理论为基础，考虑问题偏于简单化，有的外延效果不好，有的原理复杂，导致预测精度不高或难以使用。

同时，以往国内学者在预测区域地下水埋深时，往往忽略地下水埋深序列的复杂性，导致难以充分挖掘地下水埋深变化过程所蕴含的信息，用于指导实践时就显得实用性不足。因此，本章尝试在前述建三江分局逐月地下水埋深序列复杂性诊断的基础上，采用适当的方法，建立建三江分局各分区复杂地下水埋深序列的数学预测模型，为当地地下水资源分区管理提供参考。

第一节　建三江分局北区复杂地下水埋深序列动态变化规律研究

建三江分局北区包括青龙山、勤得利、浓江及鸭绿河 4 个农场，土地总面积 2900.81km²，2009 年，耕地总面积为 14.70 万 hm²。该区设有勤得利鲟鳇鱼省级自然保护区、青龙河、浓江及鸭绿河分局级自然保护区，机械化水平及商品粮率高，以种植水稻、玉米、大豆、小麦为主。从 20 世纪 90 年代开始，该区尝试种植水稻，水稻面积逐年增加，到 2009 年，水稻面积达到 10.5 万 hm²，占耕地面积的 71.4%。由于缺少控制性工程，该区农业灌溉主要以地下水为主，导致地下水位持续下降。同时，在降水、蒸发、水文地质条件等因素的影响下，该区地下水动态变化的复杂特征日益明显。因此，有必要在复杂性诊断的前提下，对建三江分局北区复杂地下水埋深序列动态变化进行分析预测，以实现当地地下水资源可持续利用。

一般来说，水文时间序列的复杂性越高，其可预测性就越低[9-11]。因此，对于复杂性较高的水文时间序列，要提高其预测精度，就应注意选择适宜的方法。近些年发展起来的小波分析方法可以充分展示水文时间序列的精细结构，便于提取水文时间序列的变化规律。因此，本节尝试以建三江分局北区为例，建立基于小波变换的建三江分局北区逐月地下水埋深组合随机预测模型。

一、基于小波变换的组合随机模型建模基本思路

首先采用快速小波变换算法（例如 A Trous 算法）对水文时间序列 $f(t)$ 进行小波分解，得到某尺度 P 下的小波变换序列 $\{W^1(t), W^2(t), \cdots, W^P(t), C^P(t)\}$；然后对各小波变换序列的主要成分（随机成分或确定成分）进行识别，对各小波变换序列进行互相关分析，并建立各小波变换序列适宜的数学模型；最后采用小波变换重构算法得到所研究水文时间序列 $f(t)$ 的组合随机预测模型[12-15]。

二、基于小波变换的建三江分局北区地下水埋深组合随机预测模型

由表 4 - 29 可以看出，建三江分局北区 4 个农场所选逐月地下水埋深序列复杂性排序分别为③、⑪、②、④，其中，浓江农场 8 区排序为②，在北区 4 个农场中复杂性排序最高，因此，选择浓江农场 8 区逐月地下水埋深序列作为代表，分析其动态变化规律，作为建三江分局北区地下水埋深动态变化总体特征。现根据浓江农场 8 区 1997～2006 年的逐月地下水埋深实测序列资料（见图 5 - 1）建立基于小波变换的组合随机预测模型，将 2007 年的逐月地下水埋深实测序列资料作为预留检验。

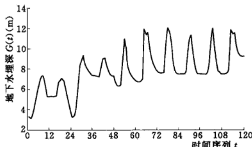


图 5 - 1　浓江农场 8 区逐月地下水埋深变化曲线（1997～2006 年）

由图 5 - 1 可以看出，浓江农场 8 区的逐月地下水埋深呈逐渐增长的态势。经过计算，1997～2006 年，浓江农场 8 区的年平均地下水埋深由 5.31m 增加到 9.40m，地下水埋深年平均增幅为 0.45m。同时，浓江农场 8 区逐月地下水埋深序列虽然总体具有较为明显的年周期变化特性，但由于其均值、方差变化很不平稳，属于非平稳时间序列，所以其动态变化还包含较为显著的随机、非线性等复杂性特征。

（一）逐月地下水埋深序列小波分解与重构

采用前述的 A Trous 算法，取尺度数 $P=2$，对浓江农场 8 区 1997～2006 年的逐月地下水埋深序列 $G(t)$（$t=1\sim120$）进行分解。由于需要用到边界以外的数据，因此需要进行边界延拓。传统的小波变换边界延拓方法有零值延拓、恒值延拓（边界重复延拓）、对称延拓、线性延拓、抛物线延拓、平滑延拓[12,16-19]、镜像对称延拓[20]、点对称延拓[21]、正交多项式拟合延拓[22]等。若边界延拓方法选择不当，会产生较大的误差，导致难以充分挖掘数据序列所蕴含的信息。因此，对某一水文时间序列进行小波分解时，应对不同边界延拓方案的延拓效果进行对比分析，以筛选合适的边界延拓方案，改善小波分析中存在的边界效应[23,24]问题。

充分利用原始序列数据，采用 15 种边界延拓方案（见表 5 - 1）对背景序列 $C^1(t)$ 进行边界延拓，得到背景序列 $C^2(t)$（$t=103\sim120$）的估计值。在正交多项式拟合延拓方案中，取拟合点数 $n_1=48$，拟合阶数 $n_2=2$[22]。计算不同边界延拓方案下背景序列 $C^2(t)$

延拓曲线，如图 5 - 2 所示。

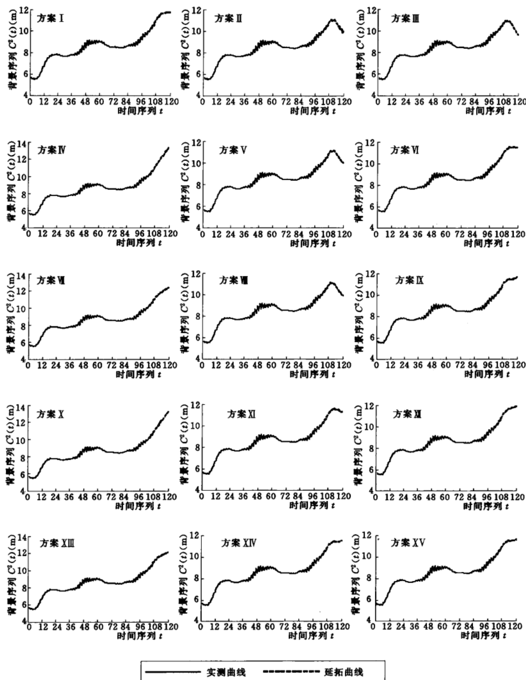


图 5 - 2　不同边界延拓方案下背景序列 $C^2(t)$ 延拓效果对比（t=103～120）

表 5-1　　背景序列 $C^1(t)$ 边界延拓方案

序　号	边　界　延　拓　方　案
Ⅰ	边界重复延拓
Ⅱ	对称延拓
Ⅲ	线性延拓
Ⅳ	正交多项式拟合延拓
Ⅴ	边界重复延拓（0.5）＋对称延拓（0.5）
Ⅵ	边界重复延拓（0.5）＋线性延拓（0.5）
Ⅶ	边界重复延拓（0.9）＋正交多项式拟合延拓（0.1）
Ⅷ	对称延拓（0.5）＋线性延拓（0.5）
Ⅸ	对称延拓（0.5）＋正交多项式拟合延拓（0.5）
Ⅹ	线性延拓（0.5）＋正交多项式拟合延拓（0.5）
Ⅺ	边界重复延拓（0.9）＋对称延拓（0.05）＋线性延拓（0.05）
Ⅻ	边界重复延拓（0.85）＋对称延拓（0.05）＋正交多项式拟合延拓（0.1）
XⅢ	边界重复延拓（0.9）＋线性延拓（0.05）＋正交多项式拟合延拓（0.05）
XⅣ	对称延拓（0.35）＋线性延拓（0.35）＋正交多项式拟合延拓（0.3）
XⅤ	边界重复延拓（0.2）＋对称延拓（0.3）＋线性延拓（0.2）＋正交多项式拟合延拓（0.3）

注　表中括号中的数字表示相应边界延拓方法的权重。

小波分解背景序列 $C^2(t)$ 一般代表原序列的趋势项，由图 5-2 可以看出，采用方案 XⅣ［对称延拓（0.35）＋线性延拓（0.35）＋正交多项式拟合延拓（0.3）］对背景序列 $C^1(t)$ 进行边界延拓，所得到的背景序列 $C^2(t)$ 最能反映原序列波动增长的态势。因此，对于序列 $G(t)$ 来说，方案 XⅣ 为最佳边界延拓方案。

采用前述 A Trous 算法，选择边界延拓方案 XⅣ，得到小波分解序列 $\{W^1(t), W^2(t), C^2(t)\}$，见图 5-3（a）、（b）、（c）。将各小波分解序列进行叠加，得到重构序列，如图 5-3（d）所示。由图 5-3（d）可以看出，重构过程与图 5-1 中序列 $G(t)$ 变化过程完全一致，因此，采用 A Trous 算法对浓江农场 8 区逐月地下水埋深序列进行分解是可行的。

（二）小波变换序列成分识别

通过绘制自相关图和方差谱密度图来识别图 5-3 中各小波变换序列成分。自相关系数及其容许限计算公式如下[25,26]：

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k}(X_t - \overline{X})(X_{t+k} - \overline{X})}{\sum_{t=1}^{n}(X_t - \overline{X})^2} \tag{5-1}$$

式中：r_k 为自相关系数；$\overline{X}$为序列 X_t 的均值；k 为滞时（时移），$k=1, 2, \cdots, m$，$m \leqslant n$。若 $n>50$，可取 $m<n/4$，经常取 $m=n/10$ 左右；若 $n<50$，可取 $m=n/4$ 左右，但要求 $m>10$。

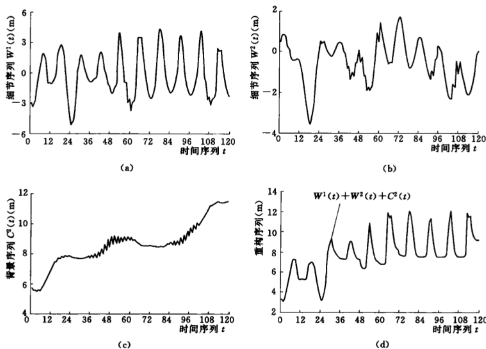


图 5-3 浓江农场 8 区逐月地下水埋深序列小波分解与重构

$$r_k(\alpha=5\%)=\frac{-1\pm1.96\sqrt{n-k-1}}{n-k} \tag{5-2}$$

式中：$r_k(\alpha=5\%)$ 为显著性水平 $\alpha=5\%$（即置信水平为 $1-\alpha=95\%$）的自相关系数容许限。

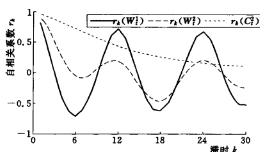


图 5-4 各小波变换序列自相关图

小波变换序列样本数 $n=120$，取最大滞时 $m=30$。采用式（5-1）计算各小波变换序列的自相关系数，绘制自相关图（由于未到模型识别阶段，所以没有加绘 95%容许限），如图 5-4 所示。

方差谱密度计算公式如下[25,27]：

$$S_{f_j}=2\left[1+2\sum_{k=1}^{m}D_k r_k\cos2\pi f_j k\right] \tag{5-3}$$

式中：S_{f_j} 为经过平滑处理的方差谱密度；k、r_k 与式（5-2）中的含义相同；f 为普通频率，$f=\omega/(2\pi)$，ω 为角频率，计算时，取 $f_j=j/(2m)$，$j=1, 2, \cdots, m$；D_k 为平滑函数（谱窗），经常采用海宁窗，即 $D_k=0.5+0.5\cos(\pi k/m)$。

采用式（5-3）绘制各小波变换序列方差谱密度图，如图 5-5 所示。

由图5-3、图5-4和图5-5可以看出，小波分解序列$W^1(t)$具有很强的以12个月（1年）为周期的变化规律，因此可以近似认为$W^1(t)$代表序列$G(t)$的周期项，属于确定性成分；小波分解序列$W^2(t)$虽然也具有一定周期性，但不如$W^1(t)$显著，以随机性变化为主，因此可以近似认为$W^2(t)$代表序列$G(t)$的随机项，属于随机性成分；小波分解序列$C^2(t)$没有周期变化规律，且具有明显的趋势性，因此可以近似认为$C^2(t)$代表序列$G(t)$的趋势项，属于确定性成分[25,28]。

图5-5　各小波变换序列方差谱密度图

（三）小波变换序列互相关分析

对于水文时间序列X_t和Y_t（$t=1, 2, \cdots, n$），其互相关系数及容许限计算公式为[25,29]：

$$r_k(X,Y)=\frac{\sum_{t=1}^{n-k}(X_t-\overline{X})(Y_{t+k}-\overline{Y})}{\left[\sum_{t=1}^{n}(X_t-\overline{X})^2\sum_{t=1}^{n}(Y_t-\overline{Y})^2\right]^{1/2}} \tag{5-4}$$

式中：$r_k(X, Y)$为序列X_t和Y_t在滞时为k时的互相关系数；$\overline{X}$、$\overline{Y}$为序列X_t和Y_t的均值。

$$|r_{0k}(\alpha=5\%)|=\frac{t_p}{\sqrt{t_p^2+n-2}} \tag{5-5}$$

式中：$r_{0k}(\alpha=5\%)$为显著性水平$\alpha=5\%$的互相关系数容许限；t_p为置信水平$p=1-\alpha=95\%$时的t分布值。

利用式（5-4）和式（5-5）计算各小波变换序列的互相关系数及其容许限，绘制互相关图，如图5-6所示。图5-6中，$r_k(W^1, W^2)$表示序列$W^1(t)$与$W^2(t)$之间的互相关系数；$r_k(W^1, C^2)$表示序列$W^1(t)$与$C^2(t)$之间的互相关系数；$r_k(W^2, C^2)$表示序列$W^2(t)$与$C^2(t)$之间的互相关系数。

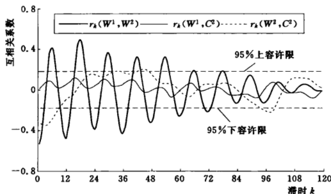


图5-6　各小波变换序列互相关图

由图 5-6 可以看出，互相关系数 $r_k(W^1, W^2)$ 超出 95%容许限的点数较多，这主要是由于原始序列复杂性特征明显，小波变换序列 $W^1(t)$ 与 $W^2(t)$ 为具有周期或近似周期成分的非平稳序列，二者蕴含的部分信息重叠所导致的。因此，需要对序列 $W^1(t)$ 与 $W^2(t)$进行平稳化处理。

（四）小波变换序列 $W^1(t)$、$W^2(t)$ 平稳化处理

1. 小波变换序列 $W^1(t)$ 平稳化处理

由于序列 $W^1(t)$ 具有明显的以 12 个月（1 年）为周期的变化规律，因此对其进行季节差分[30-32]，即：

$$W^{1*}(t)=\nabla_{12}W^1(t)=W^1(t)-W^1(t-12)=(1-B^{12})W^1(t) \tag{5-6}$$

式中：∇_{12}为向后季节差分算子；B^{12}为后移算子。

绘制小波变换差分序列 $W^{1*}(t)$ 变化曲线，如图 5-7 所示。

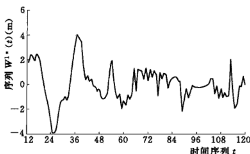


图 5-7　小波变换差分序列 $W^{1*}(t)$ 变化曲线

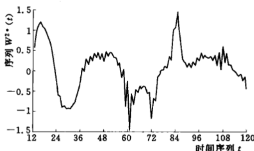


图 5-8　小波变换对数转换差分序列 $W^{2**}(t)$ 变化曲线

2. 小波变换序列 $W^2(t)$ 平稳化处理

由于序列 $W^2(t)$ 具有较为明显的以 12 个月（1 年）为周期的变化规律，同时考虑到序列 $W^2(t)$ 非平稳性较强，因此，首先采用公式 $W^{2*}(t)=\ln[2-W^2(t)]$对其进行对数转换[33,34]，然后对序列 $W^{2*}(t)$ 进行季节差分，得到序列 $W^{2**}(t)$，如图 5-8 所示。

（五）平稳化处理后小波变换序列互相关分析

利用前述方法计算序列 $W^{1*}(t)$、$W^{2**}(t)$ 及 $C^2(t)$ 的互相关系数及其容许限，绘制互相关图，如图 5-9 所示。

由图 5-9 可以看出，经过平稳化处理后，互相关系数基本上落在 95%容许限范围以内，且趋近于 0。因此，各序列互相关性较小，可以近似认为序列 $W^{1*}(t)$、$W^{2**}(t)$ 和 $C^2(t)$ 两两独立。上述互相关分析结果表明：序列 $W^{1*}(t)$、$W^{2**}(t)$ 和 $C^2(t)$ 成分近似单一，比序列 $G(t)$ 要简单，同时，序列 $W^{1*}(t)$ 和 $W^{2**}(t)$ 经过反平稳化处理即可还原为小波变换序列 $W^1(t)$ 和 $W^2(t)$，因此，分析和处理 $G(t)$ 就转化为对 $W^{1*}(t)$、$W^{2**}(t)$ 和 $C^2(t)$ 进行处理。

（六）建立序列 $W^{1*}(t)$ 的自回归模型

由于序列 $W^{1*}(t)$ 为原始序列近似周期项 $W^1(t)$ 经过季节差分而得，属于确定性成

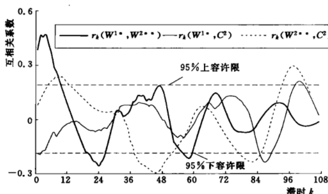


图 5-9 平稳化处理后小波变换序列互相关图

分，因此，可以借助随机水文学中的自回归模型（略去随机变量 ε_t）对序列 $W^{1*}(t)$ 进行描述。

经过计算，小波变换差分序列 $W^{1*}(t)(n=108)$ 的均值 $\overline{W_t^{1*}}=-0.0068\approx 0$，方差 $\sigma^2_{W^{1*}}=2.0866$，偏态系数绝对值 $|C_{sw^{1*}}|=0.1773<1.96\times\sqrt{\dfrac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}}=1.96\times\sqrt{\dfrac{6\times(108-2)}{(108+1)(108+3)}}=0.4494$，所以认为序列 $W^{1*}(t)$ 服从正态分布[35,36]。

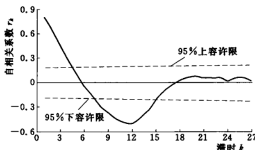


图 5-10 序列 $W^{1*}(t)$ 自相关图

对序列 $W^{1*}(t)$ 进行自相关分析，绘制自相关图，如图 5-10 所示。由图 5-10 可以看出，序列 $W^{1*}(t)$ 的自相关图具有拖尾性。

对序列 $W^{1*}(t)$ 进行偏相关分析，偏相关系数可以采用尤尔—沃尔克估计法求解，偏相关系数及其容许限计算公式为[37,25]：

$$\begin{bmatrix}\varphi_1\\ \varphi_2\\ \vdots\\ \varphi_p\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & r_1 & r_2 & \cdots & r_{p-1}\\ r_1 & 1 & r_1 & \cdots & r_{p-2}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ r_{p-1} & r_{p-2} & r_{p-3} & \cdots & 1\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}r_1\\ r_2\\ \vdots\\ r_p\end{bmatrix} \tag{5-7}$$

式中：$\varphi_k(k=1,2,\cdots,p)$ 为滞时为 k 时的偏相关系数；p 为阶数。

$$|\varphi_k(\alpha=5\%)|=\frac{1.96}{\sqrt{n}} \tag{5-8}$$

式中：$\varphi_k(\alpha=5\%)$ 为显著性水平 $\alpha=5\%$ 的偏相关系数容许限。

采用式（5-7）和式（5-8）计算序列 $W^{1*}(t)$ 的偏相关系数及其容许限，绘制偏相关图，如图 5-11 所示。

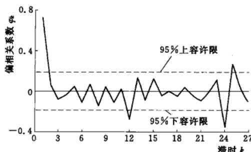


图 5-11　序列 $W^{1*}(t)$ 偏相关图

由图 5-11 可以看出，当 $k>12$ 时，大部分 φ_k 均在 95%容许限范围以内，且趋近于 0，因此序列 $W^{1*}(t)$ 偏相关图具有截尾性，再结合其自相关图具有拖尾性，所以初步判定模型形式为 AR(p) 模型，模型阶数为 12 阶，属于 AR(12) 模型[25,31,38]。选定 $k=1$、12（偏相关系数超出 95%容许限范围），则 AR(12) 模型为：

$$\hat{W}^{1*}(t)=0.7216W_{t-1}^{1*}-0.2698W_{t-12}^{1*} \tag{5-9}$$

式中：$\hat{W}^{1*}(t)$为 $W^{1*}(t)$的预测值。

采用 BIC 准则对 AR（p）模型的阶数进行进一步识别。当 $p=12$ 时，BIC 达到最小值，BIC(12)=108ln0.4778+12ln108=−23.5792。这说明初步确定的模型阶数为 12 阶是合适的。

（七）建立序列 $W^{2**}(t)$ 的随机模型

由于序列 $W^{2**}(t)$ 为原始序列近似随机项 $W^2(t)$ 经过对数变换及季节差分而得，属于随机性成分，因此，可以借助随机水文学中的自回归模型对序列 $W^{2**}(t)$ 进行描述。

经过计算，序列 $W^{2**}(t)(n=108)$的均值$\overline{W_t^{2**}}=0.0595\approx0$，方差 $\sigma^2_{W^{2**}}=0.3086$，偏态系数绝对值$|C_{sW^{2**}}|=0.1852<0.4494$，所以认为序列 $W^{2**}(t)$ 服从正态分布。

对序列 $W^{2**}(t)$ 进行自相关分析，绘制自相关图，如图 5-12 所示。由图 5-12 可以看出，序列 $W^{2**}(t)$ 的自相关图具有拖尾性。

对序列 $W^{2**}(t)$ 进行偏相关分析，绘制偏相关图，如图 5-13 所示。

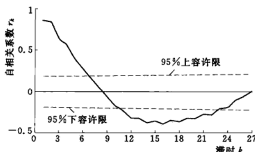


图 5-12　序列 $W^{2**}(t)$ 自相关图

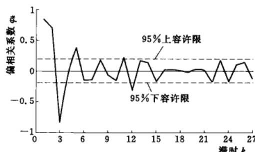


图 5-13　序列 $W^{2**}(t)$ 偏相关图

由图 5-13 可以看出，当 $k>5$ 时，大部分 φ_k 均在 95%容许限范围以内，且趋近于 0，因此序列 $W^{2**}(t)$ 偏相关图具有截尾性，再结合其自相关图具有拖尾性，所以初步判定模型形式为 AR(p) 模型，模型阶数为 5 阶，属于 AR(5) 模型。选定 $k=1$，2，3，5（偏相关系数超出 95%容许限范围），则 AR(5) 模型为：

$$W^{2**}(t)=0.0595+0.8300(W_{t-1}^{2**}-0.0595)+0.6934(W_{t-2}^{2**}-0.0595) \\ -0.8232(W_{t-3}^{2**}-0.0595)+0.3840(W_{t-5}^{2**}-0.0595)+\varepsilon_t \tag{5-10}$$

采用 BIC 准则对 AR(p) 模型的阶数进行进一步识别。当 $p=5$ 时，BIC 达到最小值，BIC(5)＝108ln(0.0291)＋5ln108＝－358.5872。这说明初步确定的模型阶数为 5 阶是合适的。

采用自相关系数综合检验法检验残差项 ε_t 是否为独立序列。构造统计量[25,39]：

$$Q = n\sum_{k=1}^{m} r_k^2(\varepsilon) \tag{5-11}$$

式中：m 为最大滞时；$r_k(\varepsilon)$ 为验残差项 ε_t 的 k 阶自相关系数。

若残差项 ε_t 为独立序列，则 Q 渐近服从自由度为 $(m-p)$ 的 χ^2 分布。选择显著性水平 α（一般 $\alpha=5\%$），若 $Q<\chi^2_{0.05}$，则残差项 ε_t 通过独立性检验。

$n=108$，取 $m=n/4=108/4=27$，经过计算，统计量 $Q=21.6560$，查 χ^2 表得 $\chi^2_{0.05}=24.996$，$Q<\chi^2_{0.05}$，所以 ε_t 为独立随机序列。对独立随机序列 ε_t 的正态性进行检验：均值 $\bar{\varepsilon}_t=-0.0055\approx 0$，方差 $\sigma_\varepsilon^2=0.0551$，偏态系数绝对值 $|C_{s\varepsilon}|=0.3886<0.4494$，因此，$\varepsilon_t\sim(0,\ 0.0551)$ 正态分布。因此，序列 $W^{2**}(t)$ 的随机模型为：

$$\begin{aligned}\hat{W}^{2**}(t)=&0.0595+0.8300(W^{2**}_{t-1}-0.0595)+0.6934(W^{2**}_{t-2}-0.0595)\\&-0.8232(W^{2**}_{t-3}-0.0595)+0.3840(W^{2**}_{t-5}-0.0595)+\varepsilon_t \qquad \varepsilon_t\sim(0,0.0551)\end{aligned} \tag{5-12}$$

式中：$\hat{W}^{2**}(t)$ 为 $W^{2**}(t)$ 的预测值。

（八）建立序列 $C^2(t)$ 的自回归模型

由于序列 $C^2(t)$ 为原始序列近似趋势项，属于确定性成分，因此，可以借助随机水文学中的自回归模型（略去随机变量 ε_t）对序列 $C^2(t)$ 进行描述。

经过计算，序列 $C^2(t)(n=120)$ 的均值 $\overline{C^2_t}=8.5940$，方差 $\sigma^2_{C^2}=2.0497$，偏态系数绝对值 $|C_{sC^2}|=0.1117<1.96\times\sqrt{\dfrac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}}=1.96\times\sqrt{\dfrac{6\times(120-2)}{(120+1)\times(120+3)}}=0.4275$，所以认为序列 $C^2(t)$ 服从正态分布。

对序列 $C^2(t)$ 进行自相关分析，如图 5-14 所示。由图 5-14 可以看出，序列 $C^2(t)$ 的自相关图具有拖尾性。

对序列 $C^2(t)$ 进行偏相关分析，绘制偏相关图，如图 5-15 所示。

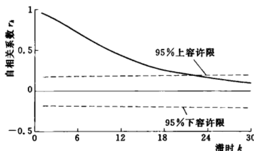


图 5-14　序列 $C^2(t)$ 自相关图

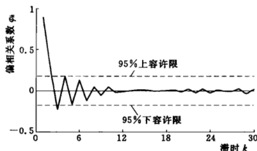


图 5-15　序列 $C^2(t)$ 偏相关图

由图 5－15 可以看出，当 $k>3$ 时，大部分 φ_k 均在 95%容许限范围以内，且趋近于 0，因此序列 $C^2(t)$ 偏相关图具有截尾性，再结合其自相关图具有拖尾性，所以初步判定模型形式为 AR(p) 模型，模型阶数为 3 阶，属于 AR(3) 模型。选定 $k=1, 2, 3$（偏相关系数超出 95%容许限范围），则 AR(3) 模型为：

$$\hat{C}^2(t)=8.5940+0.8889(C_{t-1}^2-8.5940)+0.2438(C_{t-2}^2-8.5940)-0.2247(C_{t-3}^2-8.5940) \tag{5-13}$$

式中：$\hat{C}^2(t)$ 为 $C^2(t)$ 的预测值。

采用 BIC 准则对 AR(p) 模型的阶数进行进一步识别。当 $p=3$ 时，BIC 达到最小值，BIC(3)$=120\ln 0.2536+3\ln 120=-150.2772$。这说明初步确定的模型阶数为 3 阶是合适的。

（九）模型组合

将上述各序列数学模型进行还原并叠加，就可以得到基于小波变换的浓江农场 8 区逐月地下水埋深组合随机预测模型，即：

$$\begin{cases}\hat{W}^{1*}(t)=0.7216W_{t-1}^{1*}-0.2698W_{t-12}^{1*}\\ \hat{W}^{1}(t)=\hat{W}^{1*}(t)+W^{1}(t-12)\\ \hat{W}^{2**}(t)=0.0595+0.8300(W_{t-1}^{2**}-0.0595)+0.6934(W_{t-2}^{2**}-0.0595)\\ \qquad -0.8232(W_{t-3}^{2**}-0.0595)+0.3840(W_{t-5}^{2**}-0.0595)+\varepsilon_t\\ \hat{W}^{2*}(t)=\hat{W}^{2**}(t)+W^{2*}(t-12)\\ \hat{W}^{2}(t)=2-e^{\hat{W}^{2*}(t)}\\ \hat{C}^2(t)=8.5940+0.8889(C_{t-1}^2-8.5940)\\ \qquad +0.2438(C_{t-2}^2-8.5940)-0.2247(C_{t-3}^2-8.5940)\\ \hat{G}(t)=\hat{W}^1(t)+\hat{W}^2(t)+\hat{C}^2(t)\end{cases} \tag{5-14}$$

（十）基于小波变换的组合随机模型拟合

采用建立的基于小波变换的逐月地下水埋深组合随机模型对浓江农场 8 区 1997～2006 年的逐月地下水埋深进行拟合，如图 5－16 所示。从图 5－16 中可以看出，基于小波变换的浓江农场 8 区逐月地下水埋深组合随机模型拟合效果良好。

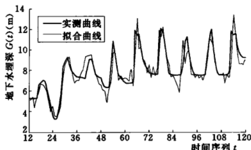


图 5－16　基于小波变换的浓江农场 8 区逐月地下水埋深组合随机模型拟合曲线

（十一）基于小波变换的组合随机模型精度检验

采用所建基于小波变换的组合随机模型的拟合数据进行拟合效果检验，并采用未参加建模的 2007 年逐月地下水埋深实测数据进行试报效果检验，具体计算结果

见表 5-2。

表 5-2　　基于小波变换的组合随机模型精度检验结果

拟合效果指标				试报效果指标 E_3（%）
C	p	E_1（%）	E_2	
0.3208	0.9444	14.13	0.9259	83.33

根据有关文献可知，后验差比值 C、拟合准确率 E_2 和试报效果指标 E_3 均达到Ⅰ级标准，小误差频率 p 达到Ⅱ级标准，相对均方误差 E_1 达到Ⅲ级标准[40,41]。因此，所建基于小波变换的浓江农场 8 区逐月地下水埋深组合随机模型拟合效果良好，预测精度较高，可用于预测浓江农场 8 区未来地下水埋深。

（十二）地下水埋深预测

现采用所建基于小波变换的逐月地下水埋深组合随机模型预测浓江农场 8 区 2008～2011 年逐月地下水埋深，地下水埋深预测值及预测曲线分别见表 5-3 和图 5-17。从表 5-3 和图 5-17 中可以看出，如果仍然采用过去的地下水开采模式，浓江农场 8 区的地下水位将会波动升降。2008～2011 年地下水埋深年际变幅分别为 －1.28m、0.52m、0.08m 和 －0.12m，处于减小→增大→增大→减小的波动变化状态，年平均地下水埋深维持在 10m 左右，与 4～6m 的地下水理想埋深[42]差距较大。因此，浓江农场 8 区应加大地下水管理力度，以保护当地有限的地下水资源。

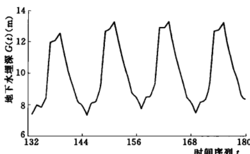


图 5-17　基于小波变换的浓江农场 8 区逐月地下水埋深组合随机模型预测曲线（2008～2011 年）

表 5-3　　浓江农场 8 区逐月地下水埋深预测值（2008～2011 年）　　单位：m

年份＼月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
2008	7.4118	7.9645	7.8243	8.4863	11.9801	12.0779	12.5336	11.1655	9.9586	9.1503	8.1838	7.9454	9.56
2009	7.3383	8.0817	8.1816	9.0356	12.6974	12.7893	13.2663	11.8944	10.6546	9.8109	8.7365	8.4515	10.08
2010	7.7792	8.4760	8.5244	9.3032	12.9034	12.9148	13.3161	11.8589	10.5339	9.6153	8.4798	8.1595	10.16
2011	7.4709	8.1710	8.2395	9.0524	12.6953	12.7523	13.2019	11.7968	10.5272	9.6653	8.5838	8.3112	10.04

第二节　建三江分局中区复杂地下水埋深序列动态变化规律研究

建三江分局中区包括前进、洪河、前锋、二道河及前哨 5 个农场，土地总面积 3747.85km²，2009 年，耕地总面积为 24.0 万 hm²。该区设有洪河国家级自然保护区及前锋分局级自然保护区，机械化水平及商品粮率高，以种植水稻、玉米、大豆、小麦为主。

从 20 世纪 90 年代开始，该区尝试种植水稻，水稻面积逐年增加，到 2009 年，水稻面积达到 16.3 万 hm^2，占耕地面积的 67.9%。由于缺少控制性工程，该区农业灌溉主要以地下水为主，导致地下水位持续下降。同时，在降水、蒸发、水文地质条件等因素的影响下，该区地下水动态变化的复杂特征日益明显。因此，有必要在复杂性诊断的前提下，对建三江分局中区复杂地下水埋深序列动态变化进行分析预测，以实现区域地下水资源可持续利用。

1998 年，Huang N E 等人提出了一种非线性、非平稳时间序列分析的新方法——经验模态分解（empirical mode decomposition，简称 EMD）[43]。EMD 法具有自适应特性，克服了小波分析中的基函数选择等问题[44]，比小波分析具有更强的局部表现能力，可以将原始数据分解为一系列具有不同时间尺度局部特征信息及明显物理背景的本征模态函数（intrinsic mode function，简称 IMF）分量[45]，同时可以分析数据序列所蕴含的趋势[46]，是一种非常有效的数据挖掘工具。因此，EMD 法已经广泛应用于金融[44,47]、水文水资源[45,48]、气象[46,49]、故障诊断[50,51]、医学[52,53]等领域中，取得了较为满意的效果，但在地下水预测中应用较少。

20 世纪 80 年代末，Moody J 和 Darken C 提出了一种前向型神经网络——径向基函数（Radial Basis Function，简称 RBF）神经网络[54,55]。RBF 神经网络具有结构自适应确定、输出与初始权值无关等优良特性[54,56,57]，同时，其收敛速度、外推能力及非线性映射能力均优于传统的 BP 神经网络[55]。因此，RBF 神经网络已经广泛应用于包括地下水预测的众多领域中。

本节尝试将 EMD 法与 RBF 神经网络相结合，建立建三江分局中区复杂地下水埋深序列预测模型。

一、EMD 法基本原理

（一）EMD 法基本思想

若某一时间序列 $f(t)$ 中极大值（或极小值）数目与上跨零点（或下跨零点）数目之差不小于 2，则该序列就需要进行平稳化处理[45,57,58]，生成一系列 IMF 分量。IMF 应满足以下两个条件[44,45,50,52,57]：

（1）在整个数据范围内，极值点与过零点数量相等或最多相差 1 个。

（2）在任一点处，由极大值点、极小值点形成的上、下包络线的平均值为零。

（二）EMD 算法具体步骤

采用 EMD 法处理某一时间序列 $f(t)$ 的具体步骤如下[43-53,57,58]：

（1）找出序列 $f(t)$ 所有的极大、极小值点，采用三次样条函数将其分别拟合成序列 $f(t)$ 的上包络线 $e_a(t)$、下包络线 $e_b(t)$。

（2）计算上下包络线的均值 $m_1(t)$：

$$m_1(t)=[e_a(t)+e_b(t)]/2 \tag{5-15}$$

（3）计算差值序列 $h_1(t)$：

$$h_1(t)=f(t)-m_1(t) \tag{5-16}$$

一般来说，$h_1(t)$ 不满足 IMF 条件。

（4）将 $h_1(t)$ 视为新的待处理序列，重复步骤（1）～（3），对 $h_1(t)$ 进行 k 次筛选，即：

$$\begin{cases} h_{11}(t)=h_1(t)-m_{11}(t) \\ h_{12}(t)=h_{11}(t)-m_{12}(t) \\ \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \\ h_{1k}(t)=h_{1(k-1)}(t)-m_{1k}(t) \end{cases} \tag{5-17}$$

实际操作中，利用限制标准差 SD 作为筛选过程停止准则：

$$SD=\sum_{t=1}^{N}\frac{|h_{1(k-1)}(t)-h_{1k}(t)|^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \tag{5-18}$$

式中：N 为序列样本数。

若经过第 k 次筛选后，$h_{1k}(t)$ 满足 $0.2<SD<0.3$，即可得到第一个 IMF 分量 $\mathrm{IMF1}(t)=h_{1k}(t)$。

（5）计算剩余序列 $r_1(t)$：

$$r_1(t)=f(t)-\mathrm{IMF1}(t) \tag{5-19}$$

（6）将 $r_1(t)$ 视为新的待分解序列，重复步骤（1）～（5），即可得到：

$$\begin{cases} r_2(t)=r_1(t)-\mathrm{IMF2}(t) \\ r_3(t)=r_2(t)-\mathrm{IMF3}(t) \\ \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \\ r_n(t)=r_{n-1}(t)-\mathrm{IMF}n(t) \end{cases} \tag{5-20}$$

直至剩余序列 $r_n(t)$ 中蕴含的信息对所研究内容意义很小或已成为一个单调函数无法再筛选出 IMF 为止。此时，剩余量 $r_n(t)$ 代表了原始序列的平均趋势，称为余项或趋势项，简记为 Res。而原始序列可以用一系列 IMF 分量与趋势项之和来表示，即：

$$f(t)=\sum_{i=1}^{n}\mathrm{IMF}i(t)+r_n(t) \tag{5-21}$$

（三）EMD 法端点效应问题

在应用 EMD 法过程中，由于无法确定序列的两端是否为极值点，若直接将序列的端点视为极值点，则在应用三次样条函数插值时，就使得上、下包络线在序列端点附近偏离原始序列的真实包络线而产生发散现象，并且随着“筛选过程”的继续进行，这种发散的结果会逐渐向内“污染”整个数据序列，导致分解结果严重失真，IMF 分量没有实际的物理意义，这就是所谓的端点效应问题[57,59-64]。要提高 EMD 法的应用效果，就需要采用适当方法对序列两端进行延拓，然后抛弃受“污染”的点[59]，从而有效抑制 EMD 法应用中存在的边界效应问题。抑制 EMD 端点效应的数据延拓方法较多，包括线性、BP、RBF 等神经网络延拓[57,63,65]、支持向量机和镜像延拓相结合[59]、极值点对称延拓和在信号序列上加窗函数相结合[60]、包络线性延拓[61]、端点极值包络延拓[62,66]、最大 Lyapunov 指数预测延拓[67]、半周期半对称延拓[68]、对称（镜像）周期延拓（端点为极值点）和反对称周期延拓（端点为零点）[69]、外推极值点与镜像延拓相结合[70]、自回归模型（AR 模型）预测延拓[71,72]、时间迭代法[73]、最近相似距离延拓[74]、端点优化对称延拓[75]、基于波形匹配的自适应延拓[76]、基于加权的极值点延拓[77]等方法。本文拟采用 RBF 神经网络

处理 EMD 法端点效应。

二、RBF 神经网络简介

（一）网络结构

RBF 神经网络是由输入层、单隐层、输出层所构成的三层前向型神经网络。隐层采用径向基函数（一般为高斯函数）作为传递函数，输出层采用线性函数作为传递函数[54-56,78-80]。

（二）基本思想

用径向基函数作为隐层单元的"基"构成隐层空间，将输入矢量不通过权连接而直接映射到隐层空间，当径向基函数的中心点确定后，这种非线性映射关系也就确定了。而隐层空间到输出层空间为线性映射关系，即网络输出是隐层单元输出的线性加权之和[57,79,81]。

三、EMD-RBF 神经网络耦合预测模型建模思路

首先结合 RBF 神经网络数据延拓，采用 EMD 方法得到水文时间序列的 IMF 分量及趋势项；然后采用 RBF 神经网络对分解得到的各 IMF 分量及趋势项进行预测；最后将各 IMF 分量及趋势项预测值进行叠加，即可得到原始序列预测值。上述思路所建模型称为 EMD-RBF 神经网络耦合模型，简称为 EMD-RBFNN 耦合模型，具体建模流程如图 5－18 所示。

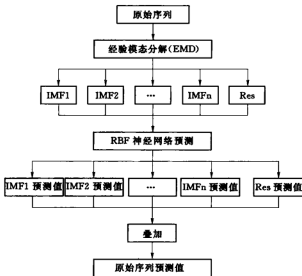


图 5－18　EMD-RBFNN 耦合模型建模流程

四、建三江分局中区地下水埋深 EMD-RBFNN 耦合预测模型

由表 4－29 可以看出，建三江分局中区 5 个农场所选逐月地下水埋深序列复杂性排序分别为⑦、⑤、⑧、⑮、⑬，其中，洪河农场 6 区排序为⑤，在中区 5 个农场中复杂性排

序最高，因此，选择洪河农场 6 区逐月地下水埋深序列作为代表，分析其动态变化规律，作为建三江分局中区地下水埋深动态变化总体特征。现根据洪河农场 6 区 1997～2006 年的逐月地下水埋深实测序列资料（见图 5-19）建立 EMD-RBFNN 耦合预测模型，将 2007 年的逐月地下水埋深实测序列资料作为预留检验。

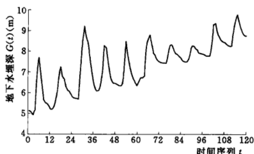


图 5-19 洪河农场 6 区逐月地下水埋深变化曲线（1997～2006 年）

（一）逐月地下水埋深序列经验模态分解

根据前述 EMD 法对洪河农场 6 区逐月地下水埋深序列 $G(t)(t=1\sim120)$ 进行分解。边界延拓采用 RBF 神经网络，设定 RBF 神经网络目标误差 GOAL=0.0001，经过试算，选定 RBF 神经网络扩展常数 SPREAD=1.5，最大神经元个数 MN=25[80,82,83]。通过编程计算，得到序列 $G(t)$ 的 5 个 IMF 分量及余项，如图 5-20 所示。

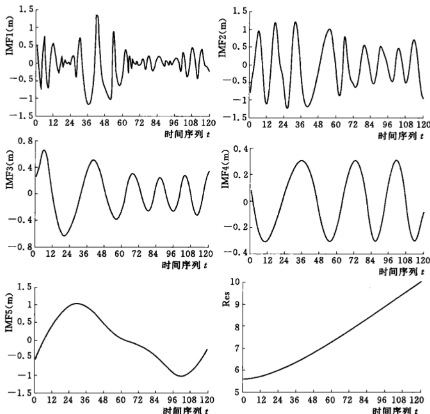


图 5-20 洪河农场 6 区逐月地下水埋深序列 IMF 分量及趋势项

由图 5 - 20 可以看出，IMF1 表示周期小于 1 年的高频成分，且以半年的周期震荡为主，代表了地下水埋深对农业生产活动（地下水开发）的响应，其主要振幅为 0.5～1.0m 左右，并伴有 1.5～2.5m 左右的大振幅波动；IMF2 表示周期为 1 年的显著震荡，代表了地下水埋深对年内降水及其他地下水补给的响应，其振幅为 1.5～2.5m 左右；IMF3 表示周期为 1.5～2.5 年左右的显著震荡，代表了地下水埋深对 1.5～2.5 年左右年际降水的响应，其振幅为 1.5～2.5m 左右；IMF4 周期为 3 年左右，代表了地下水埋深对 3 年左右年际降水的响应，其振幅为 0.6m 左右；IMF5 周期为 7 年左右，代表了地下水埋深对 7 年左右年际降水的响应，其振幅为 2.0m 左右；Res 代表了地下水埋深的总体变化趋势。

各 IMF 分量及趋势项的方差贡献率见表 5 - 4。由表 5 - 4 可以看出，Res 方差贡献率最大，高达 61.55%，这与洪河农场 6 区逐月地下水埋深序列总体增长态势是相一致的；各 IMF 分量贡献率中，IMF2、IMF5 方差贡献率均超过 10%，分别达到 13.24% 和 13.94%，携带信息量较大[84]，说明洪河农场 6 区逐月地下水埋深序列多年动态变化以 7 年和 1 年为主要周期。

表 5 - 4　　洪河农场 6 区逐月地下水埋深序列 EMD 成分方差贡献率

EMD 成分	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	Res
方差贡献率（%）	6.42	13.24	3.30	1.54	13.94	61.55

（二）基于 EMD 的逐月地下水埋深序列 RBF 神经网络预测

1. 输入、输出样本对的确定

由于序列 $G(t)$ 经过经验模态分解得到 5 个 IMF 分量及 1 个余项，因此，需要构造 6 个 RBF 神经网络。由前述分析可知，洪河农场 6 区地下水埋深动态变化规律具有明显的周期特征（周期为 0.5～7 年），因此，为了使这种周期特性在网络中能够有所反映，可采用前 i 个点值来得到第 $i+1$ 个点值的方法。本节分别选取各 IMF 分量及余项前 6 个月的数据作为网络输入，当月的 1 个数据作为网络输出，将洪河农场 6 区 10 年的 EMD 序列（均包含 120 个数据）分别生成 114 个样本对。

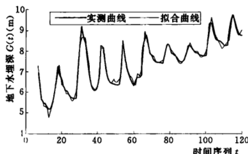


图 5 - 21　洪河农场 6 区逐月地下水埋深 EMD-RBFNN 耦合模型拟合曲线

2. 网络训练参数的确定

选定 RBF 神经网络目标误差 GOAL＝0.0001，扩展常数 SPREAD＝1.5，最大神经元个数 MN＝25。

3. EMD-RBFNN 耦合模型拟合

对各 RBF 神经网络进行训练和仿真，将仿真结果进行叠加，即可得到 EMD-RBFNN 耦合模型的拟合值，拟合结果如图 5 - 21 所示。

4. EMD-RBFNN 耦合模型精度检验

采用所建 EMD-RBFNN 耦合模型的拟合数据进行拟合效果检验，并采用未参加建模的 2007 年逐月地下水埋深实测数据进行试报效果检验，具体计算结果见表 5 - 5。

表 5-5　　EMD-RBFNN 耦合模型精度检验结果

拟合效果指标				试报效果指标
C	p	E_1（%）	E_2	E_3（%）
0.1163	1	5.60	1	83.33

根据有关文献可知，后验差比值 C、小误差频率 p、拟合准确率 E_2 和试报效果指标 E_3 均达到Ⅰ级标准，相对均方误差 E_1 达到Ⅱ级标准[40,41]。因此，所建洪河农场 6 区逐月地下水埋深 EMD-RBFNN 耦合模型拟合效果良好，预测精度较高，可用于预测洪河农场 6 区未来地下水埋深。

5. 地下水埋深预测

现采用已经训练好并经过精度检验的 EMD-RBFNN 耦合模型预测洪河农场 6 区 2008～2011 年逐月地下水埋深，地下水埋深预测值及预测曲线分别见表 5-6 和图 5-22。

表 5-6　　洪河农场 6 区逐月地下水埋深预测值（2008～2011 年）　　单位：m

年份＼月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
2008	9.0943	9.3909	9.9981	10.6933	11.1241	11.2227	11.1297	10.9667	10.7395	10.3963	9.9713	9.5645	10.36
2009	9.4134	9.7289	10.4246	11.1432	11.4669	11.4194	11.1951	10.8113	10.2776	9.6162	9.0157	8.5856	10.26
2010	8.4257	8.6135	9.1060	9.7732	10.3702	10.6693	10.7022	10.5236	10.2520	9.8830	9.4640	9.0538	9.74
2011	8.7658	8.7498	9.0528	9.5761	10.1411	10.4626	10.5189	10.3803	10.1612	9.9011	9.6146	9.3656	9.72

由表 5-6 和图 5-22 中可以看出，如果仍然采用过去的地下水开采模式，洪河农场 6 区未来的地下水位将会先降后升，但上升幅度不大，地下水恢复速率较慢。2008～2011 年地下水埋深年际变幅分别为 1.02m、－0.10m、－0.52m 和－0.02m，处于增大→减小→减小→减小的先强增后缓减状态，年平均地下水埋深维持在 10m 左右，与 4～6m 的地下水理想埋深[42]差距较大。因此，洪河农场 6 区应加大地下水管理力度，以保护当地有限的地下水资源。

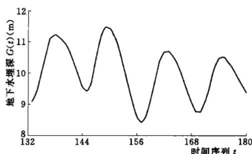


图 5-22　洪河农场 6 区逐月地下水埋深 EMD-RBFNN 耦合模型预测曲线（2008～2011 年）

第三节　建三江分局南区复杂地下水埋深序列动态变化规律研究

建三江分局南区包括七星、创业、大兴、红卫、胜利及八五九共 6 个农场，土地总面积 5447.21km²，2009 年，耕地总面积为 32.13 万 hm²。该区设有国家级农业科技示范园区、挠力河国家级自然保护区[85]、乌苏里江省级自然保护区及红卫分局级自然保护区，

机械化水平及商品粮率高，以种植水稻、玉米、大豆、小麦为主。从 20 世纪 90 年代开始，该区尝试种植水稻，水稻面积逐年增加，到 2009 年，水稻面积达到 22.2 万 hm^2，占耕地面积的 69.1%。由于缺少控制性工程，该区农业灌溉主要以地下水为主，导致地下水位持续下降。同时，在降水、蒸发、水文地质条件等因素的影响下，该区地下水动态变化的复杂特征日益明显。因此，有必要在复杂性诊断的前提下，对建三江分局南区复杂地下水埋深序列动态变化进行分析预测，以实现区域地下水资源可持续利用。

传统的地下水埋深预测方法多为单项预测模型，这些方法各有特点，但由于单项预测模型无法充分挖掘时间序列所蕴含的信息，往往精度不高。1969 年，由 Bates J M 和 Granger C W J 首次提出的组合预测方法克服了单项预测模型的不足，有利于实现各单项预测模型的优势互补，从而达到提高预测精度的目的[86-89]。组合预测模型结构一般可以分为固定结构和变结构，变权组合预测就属于变结构组合预测范畴[87]。变权组合预测模型由于能够描述各单项模型“时好时坏”的变化特性，实现各单项模型的更优组合[90]，已经广泛用于交通[87,91,92]、水文水资源[88]、人口学[89]、电力[90]、经济[93,94]、教育[95]、工程[96,97]、环境[98,99]等领域中，取得了较好的效果。

本节尝试将时间序列模型、基于残差周期修正的双向差分 GM（1，1）模型及谐波分析模型相结合，建立建三江分局南区复杂地下水埋深序列变权组合预测模型。

一、单项预测模型

（一）时间序列模型

时间序列模型是一种经典、成熟的数据挖掘工具，已经广泛应用于水文水资源[100-102]、网络工程[103]、旅游业[104]、大坝工程[105]、航空航天工业[106]等各种领域中。

时间序列模型建模步骤如下：

1. 时间序列成分

一般来讲，某一时间序列 $f(t)$ 可以表示为以下三种成分的叠加：

$$f(t)=T(t)+P(t)+R(t) \tag{5-22}$$

式中：$T(t)$ 为趋势性变化项；$P(t)$ 为周期性变化项；$R(t)$ 为随机性干扰项。

其中，$T(t)$、$P(t)$ 为确定性成分，$R(t)$ 为随机性成分[25,104]。

建模过程的主要任务就是从已知实测序列 $f(t)$（$t=1, 2, \cdots, n$）中提取趋势项、周期项和随机项，建立各分项的数学模型，然后进行叠加，就可以得到式（5-22）所示的时间序列预测模型。

2. 时间序列模型各分项的确定

（1）趋势项的确定。序列趋势项可以采用多项式逼近法[100]、指数平滑法[101]等方法提取，具体可以采用 Excel 软件自带的回归分析、添加趋势线功能[3]或 Matlab 软件中 cftool 工具箱[107]来分析提取。

（2）周期项的确定。趋势项函数确定后，即可从实测序列 $f(t)$ 中扣除趋势项，进行周期项分析，令：

$$y(t)=f(t)-\hat{T}(t) \qquad (t=1,2,\cdots,n) \tag{5-23}$$

式中：$\hat{T}(t)$ 为趋势项 $T(t)$ 的估计值。

本节采用谐波分析法[32,108,109]，利用傅立叶级数来分析提取周期项函数。序列 $y(t)$ 可以用 L 个谐波叠加的形式来表示其估计值，即：

$$\hat{y}(t)=a_0+\sum_{k=1}^{L}(a_k\cos\omega_k t+b_k\sin\omega_k t) \tag{5-24}$$

式中：$\hat{y}(t)$ 为序列 $y(t)$ 的估计值，将其作为周期项 $P(t)$ 的估计值；L 为谐波个数，取 $n/2$ 的整数部分；k 为谐波序号，$k=1，2，\cdots，L$；ω_k 为第 k 个谐波的频率，$\omega_k=\frac{2\pi k}{n}$；$a_0$ 为序列 $y(t)$ 的均值，$a_0=\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}y(t)$；$a_k$、$b_k$ 为傅立叶系数，可以按照式（5-25）进行计算：

$$a_k=\frac{2}{n}\sum_{t=1}^{n}y(t)\cos\frac{2\pi k}{n}t;b_k=\frac{2}{n}\sum_{t=1}^{n}y(t)\sin\frac{2\pi k}{n}t \qquad (k=1,2,\cdots,L) \tag{5-25}$$

序列 $y(t)$ 的谐波展开是一种曲线回归拟合，为了节省工作量，通常在 L 个谐波中选取几个较为显著的谐波相加来估计 $y(t)$，这就需要进行显著性检验。

构造统计量 F：

$$F=\frac{S_k^2/2}{(S_y^2-S_k^2)/(n-2-1)} \tag{5-26}$$

式中：S_y^2 为序列 $y(t)$ 总方差；S_k^2 为第 k 波方差对序列总方差的贡献，$S_k^2=(a_k^2+b_k^2)/2$。

统计量 F 服从自由度为（2，$n-3$）的 F 分布。

根据给定的显著性水平（一般取 $\alpha=0.05$），利用 F_α 检验，就可以确定显著谐波的序号。将确定的显著谐波叠加，就可以得到周期项模型，即：

$$\hat{P}(t)=a_0+\sum_{k=1}^{m}(a_k\cos\omega_k t+b_k\sin\omega_k t) \tag{5-27}$$

式中：$\hat{P}(t)$ 为周期项 $P(t)$ 的估计值；m 为显著谐波的个数。

（3）随机项的确定。从实测序列 $f(t)$ 中扣除趋势项 $\hat{T}(t)$ 和周期项 $\hat{P}(t)$ 后，就可以得到随机序列，即：

$$R(t)=f(t)-\hat{T}(t)-\hat{P}(t) \tag{5-28}$$

若序列 $R(t)$ 为平稳随机序列，可以考虑采用自回归模型 AR(p) 来进行模拟，AR（p）模型的基本形式为[25,32,100,101]：

$$\hat{R}(t)=\mu+\varphi_1(R_{t-1}-\mu)+\varphi_2(R_{t-2}-\mu)+\cdots+\varphi_p(R_{t-p}-\mu)+\varepsilon_t \tag{5-29}$$

式中：$\hat{R}(t)$ 为随机项 $R(t)$ 的估计值；μ 为随机序列的均值；φ_k 为随机序列 $R(t)$ 的偏相关系数，$k=1，2，\cdots，p$；p 为模型阶数；ε_t 为残差项。

建立 AR（p）模型一般包括正态性转化、模型定阶、参数估计、模型进一步识别和模型检验等步骤，具体方法见参考文献［25］和参考文献［32］。

3. 时间序列模型的建立

将上述趋势项、周期项、随机项模型叠加，即可得到序列 $f(t)$ 的时序模型。

4. 时间序列模型精度检验

按照上述方法建立的序列 $f(t)$ 的时序模型，在实际应用之前，还需要进行精度检验，具体方法见参考文献［40］和参考文献［41］。

（二）基于残差周期修正的双向差分 GM(1，1) 模型

灰色系统理论是一种成熟的系统分析方法。传统的 GM（1，1）模型具有原理简单、计算方便、建模所需数据少等优点[110,111]，但只适用于原始序列具有确定性明显增长趋势的情况[112,113]，否则预测精度不高。双向差分 GM（1，1）模型依据向前差分预报与向后差分预报误差平方和最小的原则来估计模型参数，提高了模型的预测精度，已经广泛应用于灾害学[114]、农业[115]、金融[116]、水文水资源[117]、交通[118]等领域中，取得了较好的效果。但双向差分 GM（1，1）模型无法反映时间序列的波动特性，采用残差周期修正方法可以有效解决该问题[119]。

基于残差周期修正的双向差分 GM（1，1）模型建模步骤如下[114-118]：

（1）设某时间序列为 $x_{1t}^{(0)}$（$t=1,2,\cdots,n$），对其进行一次累加生成处理，得：

$$x_{1t}^{(1)} = \sum_{j=1}^{t} x_{1j}^{(0)} \quad (t = 1,2,\cdots,n) \tag{5-30}$$

（2）对原始序列进行准光滑性检验，对累加生成序列进行准指数规律检验，检验公式如下[110,112,120]：

$$\rho_t = \frac{x_{1t}^{(0)}}{x_{1,t-1}^{(1)}} \tag{5-31}$$

若 $t>3$ 时，$\rho_t<0.5$，则满足准光滑性条件。

$$\delta_t = \frac{x_{1t}^{(1)}}{x_{1,t-1}^{(1)}} \tag{5-32}$$

若 $t>3$ 时，$\delta_t \in [1, 1.5]$，则满足准指数规律条件。

（3）将 GM（1，1）微分方程：

$$\frac{\mathrm{d}x^{(1)}}{\mathrm{d}t} + ax^{(1)} = u \tag{5-33}$$

改写为：

$$\frac{\mathrm{d}x_1^{(1)}}{\mathrm{d}t} = b_0 x_0^{(1)} + b_1 x_1^{(1)} = \sum_{i=0}^{1} b_i x_i^{(1)} \tag{5-34}$$

式中：$x_0^{(1)}=1$，$b_1=-a$，$b_0=u$。

对于等间隔采样时间序列，$\Delta t=1$，变式（5-34）为差分方程：

$$\nabla x_1^{(1)} = \sum_{i=0}^{1} b_i x_i^{(1)} \tag{5-35}$$

（4）对序列 $x_{1t}^{(1)}$ 进行双向差分处理：

$$\begin{cases} \text{向后差分} \quad \nabla_b x_{1t}^{(1)} = x_{1t}^{(1)} - x_{1,t-1}^{(1)} = x_{1t}^{(0)} \\ \text{向前差分} \quad \nabla_f x_{1t}^{(1)} = x_{1,t+1}^{(1)} - x_{1t}^{(1)} = x_{1,t+1}^{(0)} \end{cases} \tag{5-36}$$

式中：$\nabla_b x_{1t}^{(1)}$、$\nabla_f x_{1t}^{(1)}$ 分别为序列 $x_{1t}^{(1)}$ 的一阶向后差分及一阶向前差分。

（5）从预报观点看，将式（5-35）视为用右边变量 x_0、x_1 对左边增量 ∇x_1 的预报，因此，必然存在预报误差：

$$
\begin{cases}
\text{向后差分预报误差} \quad \varepsilon_b = \nabla_b x_1^{(1)} - \sum_{i=0}^{1} b_i x_i^{(1)} \\
\text{向前差分预报误差} \quad \varepsilon_f = \nabla_f x_1^{(1)} - \sum_{i=0}^{1} b_i x_i^{(1)}
\end{cases}
\tag{5-37}
$$

为了充分利用序列 $x_{1t}^{(0)}$ 中所蕴含的信息，令向前、向后差分的误差之和达到最小，即：

$$
e^2 = \sum_{t=2}^{n-1} (\varepsilon_{bt}^2 + \varepsilon_{ft}^2) \to \min \tag{5-38}
$$

式中：t 从 2 开始，是由于将 $t=1$ 时的序列值留作时间响应方程中的初始值。

（6）令 $\frac{\partial e^2}{\partial b_0}=0$、$\frac{\partial e^2}{\partial b_1}=0$，得到正规方程组：

$$
\begin{cases}
b_0 \nu_0 + b_1 s_1 = z_0 \\
b_0 s_1 + b_1 \nu_1 = z_1
\end{cases}
\tag{5-39}
$$

其中 $z_0 = \frac{1}{2(n-2)}\left(\sum_{t=2}^{n-1} x_{1t}^{(0)} + \sum_{t=2}^{n-1} x_{1,t+1}^{(0)}\right), z_1 = \frac{1}{2(n-2)}\left(\sum_{t=2}^{n-1} x_{1t}^{(0)} x_{1t}^{(1)} + \sum_{t=2}^{n-1} x_{1,t+1}^{(0)} x_{1t}^{(1)}\right)$

$s_1 = \frac{1}{n-2}\sum_{t=2}^{n-1} x_{1t}^{(1)}, \nu_0 = \frac{1}{n-2}\sum_{t=2}^{n-1} 1^2 = 1, \nu_1 = \frac{1}{n-2}\sum_{t=2}^{n-1} [x_{1t}^{(1)}]^2$

（7）令 $b=\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}$、$V=\begin{bmatrix} \nu_0 & s_1 \\ s_1 & \nu_1 \end{bmatrix}$、$Z=\begin{bmatrix} z_0 \\ z_1 \end{bmatrix}$，则式（5-39）的矩阵形式为：

$$
Z = Vb \tag{5-40}
$$

b 的最小二乘估计为：

$$
\begin{bmatrix} \hat{b}_0 \\ \hat{b}_1 \end{bmatrix} = (V^T V)^{-1} V^T Z \tag{5-41}
$$

（8）将求得的 $\hat{b}_0$、$\hat{b}_1$ 代入式（5-34），得到时间相应方程，即：

$$
\hat{x}_{1,t+1}^{(1)} = \left(x_{11}^{(1)} + \frac{\hat{b}_0}{\hat{b}_1}\right) e^{\hat{b}_1 t} - \frac{\hat{b}_0}{\hat{b}_1} \tag{5-42}
$$

式中：$\hat{x}_{1,t+1}^{(1)}$ 为累加生成序列 $x_{1t}^{(1)}$ 的预测值；$x_{11}^{(1)} = x_{11}^{(0)}$。

（9）对 $\hat{x}_{1,t+1}^{(1)}$ 进行累减处理，将其还原为原始序列 $x_{1t}^{(0)}$ 的预测值，即：

$$
\hat{x}_{1t}^{(0)} = \hat{x}_{1t}^{(1)} - \hat{x}_{1,t-1}^{(1)} \quad (t=1,2,\cdots,n) \tag{5-43}
$$

（10）对预测序列进行残差周期修正。首先对双向差分 GM（1，1）模型残差序列周期进行分析，计算各周期的变幅，用正弦（或余弦）曲线拟合残差序列，即可得到各周期不同时刻的残差修正值，计算公式如下[121,119]：

$$
\hat{E}(t_i) = -A_i \cos \frac{2\pi t_i}{T_i} \tag{5-44}
$$

式中：$\hat{E}(t_i)$ 为第 i 周期 t 时刻的残差修正值；A_i 为第 i 周期的最大振幅；T_i 为第 i 周期的大小。

实用中，为简化计算，可取平均残差绝对值作为统一振幅，即：

$$
\overline{A} = \frac{\sum_{t=1}^{n} |\varepsilon(t)|}{n} \tag{5-45}
$$

式中：$\varepsilon(t)$ 为 t 时刻的残差值，$t=1, 2, \cdots, n$；n 为残差序列样本数。

然后将残差修正值叠加到同一时刻的还原预测值上，得到原始序列的预测修正值$\tilde{x}_{1t}^{(0)}$，即：

$$\tilde{x}_{1t}^{(0)} = \hat{x}_{1t}^{(0)} + \hat{E}_t \tag{5-46}$$

（三）谐波分析模型

对于某些具有明显周期震荡规律的时间序列，可以采用谐波分析模型对其进行模拟，具体方法参见时间序列模型。

二、变权组合预测模型

（一）模型基本形式

设对于某一预测问题，有 M 种预测模型 f_1、f_2、$\cdots$、f_M，则由这 M 种模型构成的变权组合预测模型为[91,99]：

$$f(t) = K_{1t}f_{1t} + K_{2t}f_{2t} + \cdots + K_{Mt}f_{Mt} = \sum_{i=1}^{M} K_{it}f_{it} \quad (t = 1,2,\cdots,n) \tag{5-47}$$

式中：$f(t)$ 为变权组合预测模型 t 时刻的预测值；K_{it} 为第 i 种模型 t 时刻的权重系数；f_{it} 为第 i 种模型 t 时刻的预测值。

其中，K_{it} 满足以下关系：

$$\sum_{i=1}^{M} K_{it} = 1, \text{且 } K_{it} \geqslant 0 \tag{5-48}$$

（二）组合权重系数的确定

1. 拟合阶段

确定变权组合预测模型权重系数的基本原则是使样本点处组合预测误差最小。本节采用组合预测误差绝对值最小的方法，同时结合权重系数自身的要求，建立如下组合预测优化模型[88,89,91,96,99,122]：

$$\begin{cases} \min J_t = |e_t| = \left| \sum_{i=1}^{M} K_{it}e_{it} \right| \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^{M} K_{it} = 1, K_{it} \geqslant 0 \quad (t = 1,2,\cdots,n) \end{cases} \tag{5-49}$$

式中：e_t 为变权组合预测模型 t 时刻的预测误差，$e_t = f_t - Y_t = \sum_{i=1}^{M} K_{it}e_{it}$，其中，$Y_t$ 为 t 时刻的实际观测值；e_{it} 为第 i 种模型 t 时刻的预测误差，$e_{it} = f_{it} - Y_t$。

对式（5-49）进行求解，即可得到拟合阶段各样本点处最优组合权重系数 K_{it}。

2. 预测阶段

确定变权组合预测模型预测阶段权重系数的常用方法有以下两种[88,89,122]：

（1）当样本数较少或各预测模型拟合阶段各时刻的权重系数无明显规律时，可采用经验外推法，即：

$$\begin{cases} K_{i,n+1} = \dfrac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} K_{it}, K_{i,n+2} = \dfrac{1}{n}\sum_{t=2}^{n+1} K_{it}, \cdots, K_{i,n+j} = \dfrac{1}{n}\sum_{t=j}^{n+j-1} K_{it} \\ \text{其中}, \sum_{i=1}^{M} K_{i,n+j} = 1, K_{i,n+j} \geqslant 0 \quad (j = 1,2,\cdots) \end{cases} \tag{5-50}$$

式中：$K_{i,n+j}$ 为第 i 种模型 $n+j$ 时刻的权重系数。

(2) 当样本数较多，且各预测模型拟合阶段各时刻的权重系数具有一定规律性时，可以采用回归分析法，步骤如下：

1) 设第 i 种预测模型拟合阶段各时刻的最优组合权重系数为 K_{i1}、K_{i2}、…、K_{in}。

2) 以 K_{i1}、K_{i2}、…、K_{in} 为样本，建立一元回归模型 $\hat{K}_i(t) = a+bt$。

3) 计算各预测点处的组合权重系数 $\hat{K}_i(n+j)$。

4) 对 $\hat{K}_i(n+j)$ 进行归一化处理，得到 $t=n+j$ 时各预测模型的组合权重系数：

$$\begin{cases} K_{i,n+j} = \dfrac{\hat{K}_i(n+j)}{\sum\limits_{i=1}^{M} \hat{K}_i(n+j)} \\ \text{其中}, \sum\limits_{i=1}^{M} K_{i,n+j} = 1, K_{i,n+j} \geqslant 0 \quad (j=1,2,\cdots) \end{cases} \tag{5-51}$$

三、建三江分局南区复杂地下水埋深序列变权组合预测模型

由表 4-29 可以看出，建三江分局南区 6 个农场所选逐月地下水埋深序列复杂性排序分别为①、⑥、⑫、⑨、⑭、⑩，其中，七星农场 69 队排序为①，在南区 6 个农场中复杂性排序最高，因此，选择七星农场 69 队逐月地下水埋深序列作为代表，分析其动态变化规律，作为建三江分局南区地下水埋深动态变化总体特征。现根据七星农场 69 队 1997～2006 年的逐月地下水埋深实测序列资料（见图 5-23）建立变权组合预测模型，将 2007 年的逐月地下水埋深实测序列资料作为预留检验。

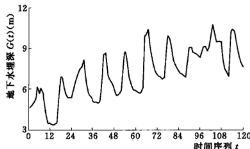


图 5-23　七星农场 69 队逐月地下水埋深变化曲线（1997～2006 年）

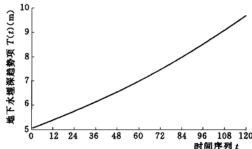


图 5-24　七星农场 69 队逐月地下水埋深趋势项曲线

（一）建立单项预测模型

1. 七星农场 69 队地下水埋深时间序列模型

(1) 建立趋势项模型。在显著性水平 $\alpha=0.05$ 的情况下，采用 Matlab 软件中 cftool 工具箱拟合趋势项，得到趋势项模型：

$$\hat{T}(t)=5.047e^{0.005428t}, R^2=0.5657 \tag{5-52}$$

根据趋势项模型，绘制趋势项曲线如图 5-24 所示。

(2) 建立周期项模型。样本数 $n=120$，则谐波数 $L=n/2=120/2=60$。按照上述方法，经过计算得到序列 $y(t)$ 的总方差 $\sigma_y^2=1.4258$，均值 $a_0=-0.0047$。在显著性水平 $\alpha=0.05$ 时，$F_\alpha=3.074$ ($n_1=2$，$n_2=117$)。通过编程计算，达到显著性水平的谐波序号为 5、10、20，计算结果见表 5-7。所以，周期项模型为：

$$\hat{P}(t)=a_0+a_5\cos\frac{2\times5\pi t}{n}+b_5\sin\frac{2\times5\pi t}{n}+a_{10}\cos\frac{2\times10\pi t}{n}+b_{10}\sin\frac{2\times10\pi t}{n}+a_{20}\cos\frac{2\times20\pi t}{n}+b_{20}\sin\frac{2\times20\pi t}{n}$$

$$=-0.0047+0.4310\cos\frac{10\pi t}{120}+0.1621\sin\frac{10\pi t}{120}-1.1812\cos\frac{20\pi t}{120}+0.0645\sin\frac{20\pi t}{120}+0.4247\cos\frac{40\pi t}{120}-0.2634\sin\frac{40\pi t}{120} \quad (5-53)$$

表 5-7　显著性检验计算结果

显著谐波序号 k	$F(k)$	傅里叶系数	
		a_k	b_k
5	4.6989	0.4310	0.1621
10	56.3731	−1.1812	0.0645
20	5.6148	0.4247	−0.2634

根据周期项模型绘制周期项曲线，如图 5-25 所示。

(3) 建立随机项模型。

1) 正态性检验。经过计算，随机序列 $R(t)$ 的均值 $\overline{R_t}=2.8993\times10^{-5}$，趋近于 0，方差 $\sigma_R^2=0.8097$，偏态系数绝对值 $|C_{sR}|=0.3530<1.96\times\sqrt{\frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}}=1.96\times\sqrt{\frac{6\times(120-2)}{(120+1)\times(120+3)}}=0.4275$，所以认为随机序列 $R(t)$ 服从正态分布。

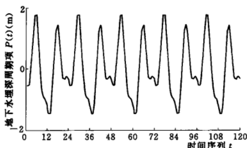


图 5-25　七星农场 69 队逐月地下水埋深周期项曲线

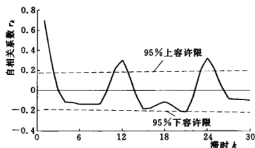


图 5-26　序列 $R(t)$ 自相关图

2) 自相关、偏相关分析。对序列 $R(t)$ 进行自相关分析和偏相关分析，绘制自相关图和偏相关图，如图 5-26 和图 5-27 所示。

由图 5-26 可以看出，序列 $R(t)$ 的自相关图具有拖尾性。由图 5-27 可以看出，当 $k>1$ 时，大部分 φ_k 均在 95% 容许限范围以内，且趋近于 0，因此序列 $R(t)$ 的偏相关图具有截尾性，所以初步判定模型形式为 AR(p) 模型，模型阶数为 1 阶，属于 AR(1) 模型。选定 $k=1$（偏相关系数超出 95% 容许限范围），则 AR(1) 模型为：

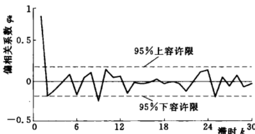


图 5-27　序列 $R(t)$ 偏相关图

$$\hat{R}(t)=\varphi_1 R_{t-1}=0.8701R_{t-1}+\varepsilon_t \tag{5-54}$$

3) AR(p) 模型的进一步识别。采用 BIC 准则对 AR(p) 模型的阶数进行进一步识别。当 $p=1$ 时，BIC 达到最小值，BIC(1) $=120\ln(0.3215)+\ln 120=-131.3834$。这说明初步确定的模型阶数为 1 阶是合适的。

4) 模型检验。AR(p) 模型检验主要是检验残差项 ε_t 是否为独立序列。本节采用自相关系数综合检验法，经过计算，统计量 $Q=35.168$，$n=120$，取 $m=30$，查 χ^2 表得 $\chi^2_{0.05}=42.557$，$Q<\chi^2_{0.05}$，所以 ε_t 为独立随机序列。

(4) 模型组合。将趋势项、周期项和随机项模型叠加，就可以得到地下水埋深动态变化预测模型，即：

$$\begin{cases}\hat{T}(t)=5.047e^{0.005428t}\\ \hat{P}(t)=-0.0047+0.4310\cos\dfrac{10\pi t}{120}+0.1621\sin\dfrac{10\pi t}{120}-1.1812\cos\dfrac{20\pi t}{120}\\ \qquad +0.0645\sin\dfrac{20\pi t}{120}+0.4247\cos\dfrac{40\pi t}{120}-0.2634\sin\dfrac{40\pi t}{120}\\ \hat{R}(t)=\varphi_1 R_{t-1}=0.8701R_{t-1}+\varepsilon_t\\ \hat{G}_1(t)=\hat{T}(t)+\hat{P}(t)+\hat{R}(t)\end{cases} \tag{5-55}$$

(5) 模型拟合与试报。采用建立的地下水埋深时间序列预测模型对七星农场 69 队 1997～2006 年的逐月地下水埋深进行拟合，对其 2007 年的逐月地下水埋深进行预测，如图 5-28 所示。由图 5-28 可以看出，虽然拟合曲线、试报曲线基本保持了原始序列的变化态势，但部分数据点处拟合误差及试报误差较大。

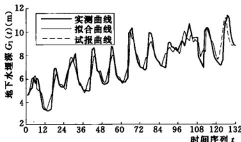


图 5-28　七星农场 69 队地下水埋深时间序列预测模型拟合与试报曲线（1997～2007 年）

2. 基于残差周期修正的七星农场 69 队地下水埋深双向差分 GM (1，1) 模型

(1) 原始序列累加处理与检验。对七星农场 69 队 1997～2006 年的逐月地下水埋深实测序列 $G(t)$（$t=1\sim120$）进行一次累加处理，得到累加生成序列 $G'(t)$。按照前述方法，经过计算，$t=3$ 时，$\rho_3=0.5333$，$t>3$ 时，$\rho_t<0.5$，因此，序列 $G(t)$ 满足准光滑性条件；$t=3$ 时，$\delta_3=1.5333$，$t>3$

时，$\delta_t \in [1, 1.5]$，因此，序列 $G'(t)$ 满足准指数规律条件。

(2) 估计模型参数。按照前述方法，经过计算得：

$$V=\begin{bmatrix} 1 & 382.9616 \\ 382.9616 & 207380 \end{bmatrix}, Z=\begin{bmatrix} 7.1578 \\ 3073.2 \end{bmatrix}$$

采用式 (5-41) 计算模型参数估计值，得：

$$\begin{bmatrix} \hat{b}_0 \\ \hat{b}_1 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 5.0638 \\ 0.0055 \end{bmatrix}$$

(3) 建立时间相应方程。初值 $G'(1)=4.64$，将参数 $\hat{b}_0$、$\hat{b}_1$ 代入式 (5-42)，得时间相应方程为：

$$\hat{G}'(t+1)=925.3309e^{0.0055t}-920.6909 \quad (t=1\sim119) \tag{5-56}$$

(4) 累加生成序列还原处理。对序列 $\hat{G}'(t)$ $(t=2\sim120)$ 进行累减处理，即可得到序列 $G(t)$ 的双向差分 GM(1，1) 模型：

$$\hat{G}_0(t)=\hat{G}'(t)-\hat{G}'(t-1) \quad (t=2\sim120) \tag{5-57}$$

(5) 双向差分 GM(1，1) 模型拟合与试报。采用建立的地下水埋深双向差分 GM(1，1) 预测模型对七星农场 69 队 1997～2006 年的逐月地下水埋深进行拟合，对其 2007 年的逐月地下水埋深进行预测，如图 5-29 所示。由图 5-29 可以看出，双向差分 GM(1，1) 模型可以提取原始序列的趋势成分，但无法拟合其他成分，大部分数据点处误差较大。

(6) 残差周期修正。绘制地下水埋深双向差分 GM(1，1) 预测模型残差序列变化曲线，如图 5-30 所示。

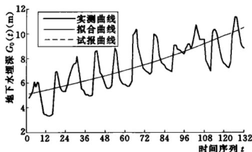


图 5-29　七星农场 69 队地下水埋深双向差分 GM(1，1) 预测模型拟合与试报曲线 (1997～2007 年)

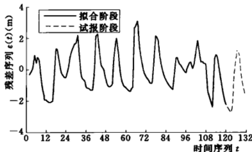


图 5-30　七星农场 69 队地下水埋深双向差分 GM(1，1) 预测模型残差曲线 (1997～2007 年)

由图 5-30 可以看出，残差序列 $\varepsilon(t)$ 的周期 $T=12$。经过计算，残差序列 $\varepsilon(t)$ 的平均残差绝对值 $\overline{|\varepsilon(t)|}=0.9676$，从而可以得到残差周期修正序列，即：

$$\hat{E}_t=-0.9676\cos\frac{2\pi t}{12} \tag{5-58}$$

(7) 模型组合。将残差周期修正值叠加到相应时刻的双向差分 GM(1，1) 模型预测值上，就可以得到地下水埋深动态变化预测模型，即：

$$\begin{cases}\hat{G}'(1)=4.64\\ \hat{G}'(t+1)=925.3309e^{0.0055t}-920.6909\\ \hat{G}_0(t)=\hat{G}'(t)-\hat{G}'(t-1)\\ \hat{E}_t=-0.9676\cos\dfrac{2\pi t}{12}\\ \hat{G}_2(t)=\hat{G}_0(t)+\hat{E}_t\end{cases} \tag{5-59}$$

(8) 基于残差周期修正的双向差分GM(1，1) 模型拟合与试报。采用建立的基于残差周期修正的地下水埋深双向差分GM(1，1) 预测模型对七星农场69队1997～2006年的逐月地下水埋深进行拟合，对其2007年的逐月地下水埋深进行预测，如图5-31所示。由图5-31可以看出，双向差分GM(1，1) 模型经过残差周期修正后，虽然预测精度提高了，但部分数据点处拟合、试报误差仍然较大。

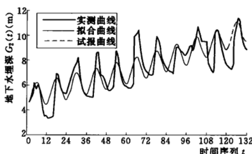


图5-31 基于残差周期修正的七星农场69队地下水埋深双向差分GM(1，1) 预测模型拟合与试报曲线

3. 七星农场69队地下水埋深谐波分析模型

样本数$n=120$，则谐波数$L=n/2=120/2=60$。按照上述方法，经过计算得到序列$G(t)$的总方差$\sigma_G^2=3.2827$，均值$\overline{G}_t=7.1288$。在显著性水平$\alpha=0.05$时，$F_\alpha=3.074$（$n_1=2$，$n_2=117$）。通过编程计算，达到显著性水平的谐波序号为1、2、3、10，计算结果见表5-8。所以，周期项模型为：

$$\begin{aligned}\hat{G}_3(t)=&\overline{G}+a_1\cos\frac{2\times1\pi t}{n}+b_1\sin\frac{2\times1\pi t}{n}+a_2\cos\frac{2\times2\pi t}{n}+b_2\sin\frac{2\times2\pi t}{n}\\ &+a_3\cos\frac{2\times3\pi t}{n}+b_3\sin\frac{2\times3\pi t}{n}+a_{10}\cos\frac{2\times10\pi t}{n}+b_{10}\sin\frac{2\times10\pi t}{n}\\ =&7.1288-0.1634\cos\frac{2\pi t}{120}-1.5914\sin\frac{2\pi t}{120}\\ &-0.2425\cos\frac{4\pi t}{120}-0.7807\sin\frac{4\pi t}{120}-0.1928\cos\frac{6\pi t}{120}\\ &-0.7979\sin\frac{6\pi t}{120}-1.2185\cos\frac{20\pi t}{120}-0.0804\sin\frac{20\pi t}{120}\end{aligned} \tag{5-60}$$

表5-8 显著性检验计算结果

显著谐波序号k	$F(k)$	傅里叶系数	
		a_k	b_k
1	37.3693	−0.1634	−1.5914
2	6.6292	−0.2425	−0.7807
3	6.6907	−0.1928	−0.7979
10	17.1904	−1.2185	−0.0804

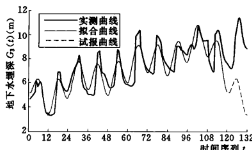


图 5-32 七星农场 69 队地下水埋深谐波分析预测模型拟合与试报曲线（1997～2007 年）

采用建立的地下水埋深谐波分析预测模型对七星农场 69 队 1997～2006 年的逐月地下水埋深进行拟合，对其 2007 年的逐月地下水埋深进行预测，如图 5-32 所示。由图 5-32 可以看出，谐波分析模型总体预测精度不高，部分数据点处拟合误差较大，特别是试报误差很大。

（二）单项预测模型适宜性分析

由前述分析可知，所建三种模型精度均不高，因此，有必要进行组合预测。根据组合预测的必要条件，采用单项预测模型进行组合预测时，需对各单项预测模型进行非劣预测模型检验，即要求各单项预测模型拟合阶段各时刻的绝对误差绝对值无恒定大小关系[91,99]。经过计算，所建三种模型在拟合阶段各时刻的绝对误差的绝对值 $|e_1(t)|$、$|e_2(t)|$、$|e_3(t)|$ 之间不存在恒定大小关系，因此，各单项预测模型互为非劣预测法，所选的 3 种预测模型符合组合预测的必要条件，可以构建组合模型对地下水埋深进行预测。

（三）确定组合权重系数

1. 拟合阶段

根据前述方法，建立如下组合预测优化模型：

$$\begin{cases} \min J_t = |e_t| = |K_{1t}e_{1t} + K_{2t}e_{2t} + K_{3t}e_{3t}| \\ \text{s.t.} \sum_{i=1}^{3} K_{it} = 1, K_{it} \geqslant 0 \quad (t = 2,3,\cdots,120) \end{cases} \tag{5-61}$$

利用 Matlab 编程，对式(5-61)进行求解，即可得到时间序列模型(模型Ⅰ)、基于残差周期修正的双向差分 GM(1,1)模型(模型Ⅱ)及谐波分析模型(模型Ⅲ)拟合阶段各样本点处的最优组合权重系数 K_{1t}、K_{2t}、K_{3t}(t=2～120)，见表 5-9 和图 5-33。

2. 预测阶段

由表 5-9 和图 5-33 可以看出，各预测模型拟合阶段各时刻的权重系数无明显规律，因此，采用式(5-50)计算预测阶段最优组合权重系数 K_{1t}、K_{2t}、K_{3t}(t=121～132)，见表 5-9 和图 5-33。

表 5-9 组合权重系数计算结果

阶段	时间序列号 t	模型Ⅰ权重系数 K_{1t}	模型Ⅱ权重系数 K_{2t}	模型Ⅲ权重系数 K_{3t}
拟合阶段	2	0.5254	0.2381	0.2365
	3	0.0000	1.0000	0.0000
	4	0.0000	1.0000	0.0000
	5	0.4933	0.3149	0.1918
	6	0.0000	1.0000	0.0000
	7	0.0153	0.5200	0.4647
	8	0.0069	0.8510	0.1421
	9	0.0091	0.1065	0.8844

续表

阶 段	时间序列号 t	模型Ⅰ权重系数 K_{1t}	模型Ⅱ权重系数 K_{2t}	模型Ⅲ权重系数 K_{3t}
拟合阶段	10	0.0000	0.0000	1.0000
	11	0.0000	0.0000	1.0000
	12	0.3910	0.1172	0.4918
	13	0.9642	0.0358	0.0000
	14	1.0000	0.0000	0.0000
	15	1.0000	0.0000	0.0000
	16	1.0000	0.0000	0.0000
	17	0.5980	0.3691	0.0329
	18	0.0000	1.0000	0.0000
	19	1.0000	0.0000	0.0000
	20	0.0000	0.0322	0.9678
	21	0.5415	0.1306	0.3279
	22	0.6862	0.1569	0.1569
	23	0.6999	0.1275	0.1726
	24	1.0000	0.0000	0.0000
	25	1.0000	0.0000	0.0000
	26	1.0000	0.0000	0.0000
	27	0.8940	0.0303	0.0757
	28	0.4720	0.2305	0.2975
	29	0.4599	0.2508	0.2893
	30	0.4872	0.0393	0.4735
	31	0.0000	0.0000	1.0000
	32	0.3928	0.5520	0.0552
	33	1.0000	0.0000	0.0000
	34	0.0000	1.0000	0.0000
	35	0.5111	0.3676	0.1213
	36	0.0000	1.0000	0.0000
	37	0.6649	0.1488	0.1863
	38	1.0000	0.0000	0.0000
	39	1.0000	0.0000	0.0000
	40	1.0000	0.0000	0.0000
	41	0.7306	0.1078	0.1616
	42	0.0000	0.0000	1.0000
	43	1.0000	0.0000	0.0000
	44	0.4996	0.2002	0.3002



续表

阶段	时间序列号 t	模型Ⅰ权重系数 K_{1t}	模型Ⅱ权重系数 K_{2t}	模型Ⅲ权重系数 K_{3t}
拟合阶段	45	0.7997	0.1388	0.0615
	46	0.9710	0.0233	0.0057
	47	0.7343	0.1063	0.1594
	48	0.6597	0.1384	0.2019
	49	0.4838	0.1863	0.3299
	50	0.0000	0.0000	1.0000
	51	0.0000	0.0000	1.0000
	52	1.0000	0.0000	0.0000
	53	0.0000	1.0000	0.0000
	54	1.0000	0.0000	0.0000
	55	1.0000	0.0000	0.0000
	56	1.0000	0.0000	0.0000
	57	0.8562	0.0395	0.1043
	58	1.0000	0.0000	0.0000
	59	0.0000	0.0000	1.0000
	60	0.5940	0.1718	0.2342
	61	0.7437	0.0931	0.1632
	62	1.0000	0.0000	0.0000
	63	1.0000	0.0000	0.0000
	64	1.0000	0.0000	0.0000
	65	0.0000	0.0000	1.0000
	66	1.0000	0.0000	0.0000
	67	1.0000	0.0000	0.0000
	68	0.5924	0.1582	0.2494
	69	0.6800	0.0297	0.2903
	70	0.5150	0.1921	0.2929
	71	0.4554	0.2421	0.3025
	72	0.6538	0.0936	0.2526
	73	0.1329	0.0000	0.8671
	74	1.0000	0.0000	0.0000
	75	1.0000	0.0000	0.0000
	76	1.0000	0.0000	0.0000
	77	0.0781	0.1339	0.7880
	78	0.0000	0.0000	1.0000
	79	1.0000	0.0000	0.0000



续表

阶　段	时间序列号 t	模型Ⅰ权重系数 K_{1t}	模型Ⅱ权重系数 K_{2t}	模型Ⅲ权重系数 K_{3t}
拟合阶段	80	1.0000	0.0000	0.0000
	81	0.8160	0.0195	0.1645
	82	0.8991	0.0691	0.0318
	83	0.8826	0.0421	0.0753
	84	1.0000	0.0000	0.0000
	85	0.1067	0.8916	0.0017
	86	0.0000	0.0000	1.0000
	87	1.0000	0.0000	0.0000
	88	1.0000	0.0000	0.0000
	89	0.9870	0.0052	0.0078
	90	0.3393	0.2586	0.4021
	91	0.3559	0.1820	0.4621
	92	0.4427	0.2127	0.3446
	93	0.0000	0.0000	1.0000
	94	0.9041	0.0619	0.0340
	95	0.7864	0.0854	0.1282
	96	1.0000	0.0000	0.0000
	97	1.0000	0.0000	0.0000
	98	1.0000	0.0000	0.0000
	99	0.3168	0.4035	0.2797
	100	0.0000	1.0000	0.0000
	101	0.0000	1.0000	0.0000
	102	0.5017	0.1997	0.2986
	103	0.0000	0.0000	1.0000
	104	0.2902	0.0117	0.6981
	105	0.2657	0.1755	0.5588
	106	1.0000	0.0000	0.0000
	107	1.0000	0.0000	0.0000
	108	1.0000	0.0000	0.0000
	109	0.0000	0.0000	1.0000
	110	1.0000	0.0000	0.0000
	111	1.0000	0.0000	0.0000
	112	1.0000	0.0000	0.0000
	113	0.0575	0.8555	0.0870
	114	0.2299	0.7697	0.0004



续表

阶　段	时间序列号 t	模型Ⅰ权重系数 K_{1t}	模型Ⅱ权重系数 K_{2t}	模型Ⅲ权重系数 K_{3t}
拟合阶段	115	0.2800	0.7170	0.0030
	116	0.4157	0.5464	0.0379
	117	0.5041	0.2778	0.2181
	118	0.4788	0.1915	0.3297
	119	0.4995	0.2083	0.2922
	120	0.1143	0.5688	0.3169
试报阶段	121	0.5754	0.1884	0.2362
	122	0.5758	0.1880	0.2362
	123	0.5806	0.1812	0.2382
	124	0.5855	0.1743	0.2402
	125	0.5863	0.1731	0.2406
	126	0.5912	0.1662	0.2426
	127	0.5960	0.1633	0.2407
	128	0.6010	0.1574	0.2416
	129	0.6060	0.1578	0.2362
	130	0.6110	0.1593	0.2297
	131	0.6162	0.1605	0.2233
	132	0.6181	0.1609	0.2210

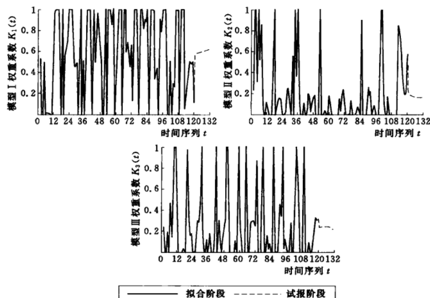


图 5-33　七星农场 69 队地下水埋变权组合预测模型权重系数曲线(1997～2007 年)

（四）建立变权组合预测模型

将各单项预测模型的拟合值及预测值分别乘以相应的组合权重系数并叠加，就可以得到地下水埋深动态变化组合预测模型，即：

$$\hat{G}(t)=K_{1t}\hat{G}_{1t}+K_{2t}\hat{G}_{2t}+K_{3t}\hat{G}_{3t} \tag{5-62}$$

（五）变权组合模型拟合

采用建立的地下水埋深变权组合预测模型对七星农场69队1997～2006年的逐月地下水埋深进行拟合，如图5-34所示。由图5-34可以看出，七星农场69队逐月地下水埋深变权组合预测模型拟合效果良好。

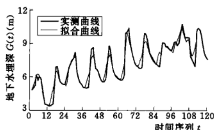


图5-34　七星农场69队地下水埋深变权组合模型拟合曲线（1997～2006年）

（六）模型精度检验

采用所建变权组合模型的拟合数据进行拟合效果检验，并采用未参加建模的2007年逐月地下水埋深实测数据进行试报效果检验，具体计算结果见表5-10。

表5-10　变权组合模型精度检验结果

拟合效果指标				试报效果指标
C	p	E_1（%）	E_2	E_3（%）
0.2014	0.9916	9.54	0.9664	91.67

根据有关文献可知，所建变权组合模型后验差比值C、小误差频率p、拟合准确率E_2、试报效果指标E_3均达到Ⅰ级标准，相对均方误差E_1达到Ⅱ级标准[40,41]。因此，所建七星农场69队逐月地下水埋深变权组合模型拟合效果良好，预测精度较高，可用于预测七星农场69队未来地下水埋深。

（七）地下水埋深预测

现依据经过精度检验的地下水埋深变权组合模型预测2008～2011年七星农场69队逐月地下水埋深，地下水埋深预测值及预测曲线分别见表5-11和图5-35。

表5-11　七星农场69队逐月地下水埋深变权组合模型预测值（2008～2011年）　单位：m

年份＼月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
2008	7.6032	7.8632	8.5335	9.4698	10.2690	10.5457	10.2885	9.7611	9.3740	9.2485	9.2645	9.2436	9.29
2009	9.1600	9.4211	10.0570	10.9179	11.6003	11.7347	11.3097	10.6068	10.0387	9.7426	9.6099	9.4755	10.31
2010	9.3516	9.5742	10.2071	11.1021	11.8539	12.0823	11.7737	11.1979	10.7634	10.5943	10.5721	10.5197	10.80
2011	10.4064	10.6468	11.2692	12.1243	12.8092	12.9518	12.5450	11.8662	11.3315	11.0728	10.9797	10.8868	11.57

由表5-11和图5-35中可以看出，如果仍然采用过去的地下水开采模式，七星农场

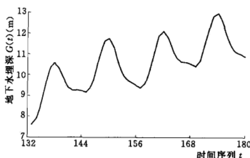


图 5-35　七星农场 69 队地下水埋深变权组合模型预测曲线（2008～2011 年）

69 队的地下水位将会持续下降。2008～2011 年地下水埋深年际增幅分别为 0.14m、1.02m、0.49m 和 0.77m，年平均地下水埋深维持在 11m 左右，与 4～6m 的地下水理想埋深差距较大[42]。因此，七星农场 69 队应加大地下水管理力度，以保护当地有限的地下水资源。

（八）讨论

将前述所建立的七星农场 69 队逐月地下水埋深单项预测模型及变权组合模型进行对比分析，见表 5-12。

表 5-12　七星农场 69 队逐月地下水埋深预测模型比较

模型类别	拟合阶段				试报阶段			
	相对误差（%）		绝对误差（m）		相对误差（%）		绝对误差（m）	
	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均
时间序列模型	34.31	6.74	2.6578	0.4691	29.29	9.62	2.2434	0.8478
基于残差周期修正的双向差分 GM(1，1) 模型	71.30	11.44	2.8793	0.7366	38.09	13.74	2.8069	1.0996
谐波分析模型	51.78	10.30	2.3336	0.6955	62.25	42.46	5.6497	4.0052
变权组合模型	34.31	3.66	1.5465	0.2416	21.27	12.09	2.3610	1.1385

注　表中相对误差和绝对误差均取绝对值。

由表 5-12 可以看出，在拟合阶段，变权组合模型拟合精度最高。在试报阶段，变权组合模型的平均相对误差、平均绝对误差及最大绝对误差虽然略高于时间序列模型，但经过计算可知，时间序列模型的试报效果指标（83.33%）小于变权组合模型（91.67%）。因此，在表 5-12 所列的四种预测模型中，变权组合模型预测精度最高。

参考文献

[1]　杨建中．地下水动态的影响因素分析［J］．科技情报开发与经济，2008，18（9）：121-122.

[2]　赵文举，马孝义，李军利，等．灰色时序组合模型及其在地下水埋深预测中的应用［J］．数学的实践与认识，2008，38（18）：70-76.

[3]　刘东，马永胜，付强．三江平原井灌水稻区地下水动态变化规律研究［J］．灌溉排水学报，2006，25（5）：42-46.

[4]　张维涛，孙军彦，吴彩云．灰色理论在平度市地下水动态变化规律中的应用研究［J］．山东水利，2009（3-4）：45-48.

[5]　Banerjee P，Prasad R K，Singh V S. Forecasting of groundwater level in hard rock region using artificial neural network［J］．Environmental Geology，2009，58（6）：1239-1246.

[6]　魏铁军，王永成，刘东．BP 网络在三江平原井灌区地下水埋深预测中的应用［J］．黑龙江水专学

报，2009，36（1）：26－30.
[7] 徐强，束龙仓，杨丹，等．北京市平谷平原地下水水位动态统计预测模型［J］．水电能源科学，2009，27（5）：58－61.
[8] 李荣峰，沈冰，张金凯．考虑周期性变化的地下水埋深预测自记忆模型［J］．农业工程学报，2005，21（7）：34－37.
[9] 佟春生，黄强，刘涵．复杂性诊断方法及其在水资源系统中的应用［J］．系统仿真学报，2005，17（11）：2649－2651，2669.
[10] 李双成，刘逢媛，赵志强．中国气候系统复杂性及其地域差异［J］．气候与环境研究，2008，13（1）：31－38.
[11] 彭涛，陈晓宏，庄承彬．基于样本熵的东江月径流序列复杂性分析［J］．生态环境学报，2009，18（4）：1379－1382.
[12] 王文圣，丁晶，李跃清．水文小波分析［M］．北京：化学工业出版社，2005.
[13] 刘东，付强．小波随机耦合模型在三江平原井灌区地下水位预测中的应用［J］．数学的实践与认识，2008，38（16）：54－62.
[14] 刘东，付强．基于小波随机耦合模型的三江平原年降水量预测［J］．数学的实践与认识，2008，38（1）：97－104.
[15] 衡彤，王文圣，李拉丁，等．基于小波变换的组合随机模型及其在径流随机模拟中的应用［J］．水电能源科学，2002，20（1）：15－17.
[16] 袁礼海，宋建社．小波变换中的信号边界延拓方法研究［J］．计算机应用研究，2006（3）：25－27.
[17] 邱自华，陈宇拓．基于小波图像编码中的边界延拓方法分析［J］．科学技术与工程，2006，6（24）：3855－3858.
[18] 吕新华，武斌，攸阳，等．小波变换 Mallat 算法实现中的边界延拓研究［J］．天津理工大学学报，2006，22（2）：14－17.
[19] 于枝伶．基于边缘检测的小波图像去噪［D］．西安：西安理工大学，2007.
[20] 杨爱萍，侯正信，王成优．边界镜像对称延拓双正交小波变换矩阵的构造［J］．中国图像图形学报，2008，13（2）：198－203.
[21] 孙蕾，罗建书．小波变换点对称边界延拓问题研究［J］．计算机应用，2008，28（2）：443－445，468.
[22] 孔超，方勇华，兰天鸽，等．小波变换中基于正交多项式拟合的边界延拓［J］．量子电子学报，2008，25（1）：25－28.
[23] 熊智新，胡慕伊，陈朝霞，等．离散小波变换算法剖析及其通用程序实现［J］．计算机工程与设计，2007，28（20）：4856－4859.
[24] 孙智，侯伟，张志成．基于渐近小波分析的随机激励下结构系统识别研究［J］．工程力学，2009，26（6）：199－204，225.
[25] 丁晶，刘权授．随机水文学［M］．北京：中国水利水电出版，1997.
[26] 李香云．绪云山林地坡面径流特征研究［D］．北京：北京林业大学，2008.
[27] 张珏，王义民，黄强，等．汉江上游石泉和安康水文站径流规律分析［J］．水电能源科学，2009，27（1）：18－20.
[28] 谢平，陈广才，夏军．变化环境下非一致性年径流序列的水文频率计算原理［J］．武汉大学学报（工学版），2005，38（6）：6－9，15.
[29] 张少文．黄河流域天然年径流变化特性分析及其预测［D］．成都：四川大学，2005.
[30] 丁裕国．气象数据时间序列信号处理［M］．北京：气象出版社，1998.
[31] 于艳华，王军，宋俊德．应用乘积季节 ARIMA 模型的话务量预测及结果分析［J］．计算机工程



与应用，2009，45（20）：99－102.
[32] 付强．农业水土资源系统分析与综合评价［M］．北京：中国水利水电出版社，2005.
[33] 高云朝．医学科研论文中非正态分布资料的统计学分析［J］．放射免疫学杂志，2008，21（1）：59－61.
[34] 陈道贵，胡乃联，李国清．区域化变量非正态分布的稳健性［J］．北京科技大学学报，2009，31（4）：412－417.
[35] 黄嘉佑．气象统计分析与预报方法［M］．北京：气象出版社，1990.
[36] 周晋红，李丽平，王宏．气候条件及其对农业影响的评价模式研究［J］．山西农业科学，2009，37（7）：58－60.
[37] 付强，门宝辉，王志良，等．非平稳时序模型在三江平原井灌水稻区地下水动态变化中的应用［J］．系统工程理论与实践，2003，23（1）：132－138.
[38] 孙佳龙，郭淑艳，郭金运．帷幕注浆引起煤矿井筒地表沉降的时序预测模型［J］．大地测量与地球动力学，2009，29（1）：119－122.
[39] 金菊良，潘金锋，张礼兵．洪水多站峰量同时模拟的随机模型［J］．灾害学，2003，18（1）：9－14.
[40] 陈南祥．地下水动态预报模型的精度评价［J］．工程勘察，1999（3）：35－38.
[41] 常亮．地下水动态随机预报模型及其算法的 Web 集成技术研究［D］．西安：西安理工大学，2006.
[42] 袁斌，杜绍敏，杨伟清，等．三江平原浅层地下水超采问题探讨（二）［J］．黑龙江水专学报，2008，35（1）：18－21.
[43] Huang N E，Shen Z，Long S R，et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non－stationary time series analysis［C］．London：The Royal Society，1998，903－995.
[44] 毕星，王巍．基于经验模式分解和移动平均的金融时间序列分析［J］．天津大学学报（社会科学版），2010，12（2）：125－128.
[45] 冯平，丁志宏，韩瑞光，等．基于 EMD 的降雨径流神经网络预测模型［J］．系统工程理论与实践，2009，29（1）：152－158.
[46] 秦旭，张讲社，延晓冬．基于改进的 EMD 的运城市持续极端气温的初步分析［J］．大气科学学报，2009，32（5）：645－651.
[47] Guhathakurta K，Mukherjee I，Chowdhury A R. Empirical mode decomposition analysis of two different financial time series and their comparison［J］．Chaos，Solitons & Fractals，2008，37（4）：1214－1227.
[48] Huang Y X，Schmitt F G，Lu Z M，et al. Analysis of daily river flow fluctuations using empirical mode decomposition and arbitrary order Hilbert spectral analysis［J］．Journal of Hydrology，2009，373（1－2）：103－111.
[49] Coughlin K T，Tung K K. 11－Year solar cycle in the stratosphere extracted by the empirical mode decomposition method［J］．Advances in Space Research，2004，34（2）：323－329.
[50] 吕永卫，熊诗波，林选，等．基于小波包和 EMD 处理的滚动轴承故障诊断［J］．太原理工大学学报，2010，41（2）：178－182.
[51] Liu B，Riemenschneider S，Xu Y. Gearbox fault diagnosis using empirical mode decomposition and Hilbert spectrum［J］．Mechanical Systems and Signal Processing，2006，20（3）：718－734.
[52] 应基光，王行愚．基于 EMD 的左右手运动想象脑电信号分析研究［J］．生物医学工程学进展，2009，30（3）：125－130.
[53] Sweeney－Reed C M，Nasuto S J. A novel approach to the detection of synchronisation in EEG based

on empirical mode decomposition [J]. Journal of Computational Neuroscience，2007，23 (1)：79 - 111.
[54] 李晶莹，钟子发．基于 RBF 的地下水动态预测 [J]．舰船电子工程，2008，28 (8)：149 - 151.
[55] 郭兰平，俞建宁，张建刚，等．基于改进 RBF 神经网络对股价的演变预测 [J]．兰州交通大学学报，2010，29 (1)：141 - 145.
[56] 罗定贵，郭青，王学军．基于 RBF 神经网络的地下水动态模拟与预测 [J]．地球学报，2003，24 (5)：475 - 478.
[57] 顾小丽，李培良，谭海涛，等．基于 RBF 神经网络的 EMD 方法在海平面分析中的应用 [J]．海洋与湖沼，2009，40 (5)：532 - 539.
[58] 卢晓亭，孙勇，笪良龙，等．基于 EMD 的 BP 神经网络海水温度时间序列预测研究 [J]．海洋技术，2009，28 (3)：79 - 82.
[59] 苏玉香，刘志刚，李科亮，等．一种改善 EMD 端点效应的新方法及其在谐波分析中的应用 [J]．电工电能新技术，2008，27 (2)：33 - 37.
[60] 李敏，程珩，张斌．EMD 端点效应处理方法的研究 [J]．太原理工大学学报，2009，40 (6)：579 - 581.
[61] 林丽，周霆，余轮．EMD 算法中边界效应处理技术 [J]．计算机工程，2009，35 (23)：265 - 268.
[62] 李海燕．一种改善 EMD 端点效应的可行方法 [J]．中国新技术新产品，2009，(18)：34 - 35.
[63] 邓拥军，王伟，钱成春，等．EMD 方法及 Hilbert 变换中边界问题的处理 [J]．科学通报，2001，46 (3)：257 - 263.
[64] 曹欣荣，薛建峰，孙粤琳．端点抑制经验模态分解在加固大坝分析中应用 [J]．三峡大学学报(自然科学版)，2008，30 (3)：41 - 44.
[65] 刘慧婷，倪志伟，李建洋．经验模态分解方法中端点问题的处理 [J]．计算机工程与应用，2008，44 (8)：27 - 30.
[66] 徐世艳．基于延拓技术的经验模态分解改进算法 [J]．吉林大学学报（信息科学版)，2009，27 (4)：359 - 365.
[67] 杨永锋，吴亚锋，任兴民，等．基于最大 Lyapunov 指数预测的 EMD 端点延拓 [J]．物理学报，2009，58 (6)：3742 - 3746.
[68] 杜修力，何立志．经验模态分解（EMD）中边界处理的新方法 [J]．北京工业大学学报，2009，35 (5)：626 - 632.
[69] 赵娜．HHT 经验模式分解的周期延拓方法 [J]．计算机仿真，2008，25 (12)：346 - 350.
[70] 王秋生，段丹辉．经验模态分解的边界效应处理技术 [J]．计算机测量与控制，2006，14 (12)：1673 - 1675.
[71] 胡维平，莫家玲，龚英姬，等．经验模态分解中多种边界处理方法的比较研究 [J]．电子与信息学报，2007，29 (6)：1394 - 1398.
[72] 张郁山，梁建文，胡聿贤．应用自回归模型处理 EMD 方法中的边界问题 [J]．自然科学进展，2003，13 (10)：1054 - 1059.
[73] 潘东夏，方世良．时间迭代法处理 EMD 中的边界效应 [J]．声学技术，2009，28 (6)：70 - 73.
[74] 王婷，杨莘元，李冰冰．一种改善 EMD 端点效应的新方法 [J]．哈尔滨理工大学学报，2009，14 (5)：23 - 26.
[75] 曹冲锋，杨世锡，杨将新．一种抑制 EMD 端点效应新方法及其在信号特征提取中的应用 [J]．振动工程学报，2008，21 (6)：588 - 593.
[76] 邵晨曦，王剑，范金锋．一种自适应的 EMD 端点延拓方法 [J]．电子学报，2007，35 (10)：1944 - 1948.

[77] 张子良，李世平．应用加权法处理 EMD 方法中的边界问题 [J]. 计量与测试技术，2008，35 (8)：34 - 36.
[78] 潘道宏．RBF 神经网络模型拟合电力抽水站水位流量关系研究 [J]. 水利科技与经济，2010，16 (3)：300 - 301.
[79] 陆文超，薛红，刘成伟，等．基于 RBF 神经网络的超市客户保持预测模型研究 [J]. 北京工商大学学报（自然科学版），2009，27 (6)：45 - 48.
[80] 许东，吴铮．基于 MATLAB 6. X 的系统分析与设计——神经网络（第二版）[M]. 西安：西安电子科技大学出版社，2002.
[81] 瞿伟廉，程磊．应用径向基函数神经网络处理 EMD 方法中的边界问题 [J]. 华中科技大学学报（城市科学版），2006，23 (4)：1 - 4，13.
[82] 农吉夫，金龙．基于 MATLAB 的主成分 RBF 神经网络降水预报模型 [J]. 热带气象学报，2008，24 (6)：713 - 717.
[83] 杨友良，许钊，王文辉．基于 MATLAB 的 RBF 神经网络的应用 [J]. 安徽冶金，2009 (4)：58 - 60.
[84] Klionsky D M，Oreshko N I，Geppener V V. Empirical Mode Decomposition in Segmentation and Clustering of Slowly and Fast Changing Non - Stationary Signals [J]. Pattern Recognition and Image Analysis，2009，19 (1)：14 - 29.
[85] 郝婧．建三江旅游资源类型分析 [J]. 今日科苑，2009 (2)：50 - 51.
[86] Bates J M，Granger C W J. The combination of forecasts [J]. Operational Research Quarterly，1969，20 (4)：451 - 468.
[87] 崔利刚，许茂增，客海生．基于预测期的变权重组合预测法及其应用 [J]. 统计与决策，2009 (15)：37 - 39.
[88] 王新民，崔巍．变权组合预测模型在地下水水位预测中的应用 [J]. 吉林大学学报（地球科学版），2009，39 (6)：1101 - 1105.
[89] 杨策，王新民，郑洪斌，等．变权组合预测模型在人口增长预测中的应用 [J]. 长春工业大学学报（自然科学版），2009，30 (6)：611 - 614.
[90] 孙广强，姚建刚，谢宇翔，等．基于新鲜度函数和预测有效度的模糊自适应变权重中长期电力负荷组合预测 [J]. 电网技术，2009，33 (9)：103 - 107.
[91] 顾晨阳，罗熹，程文龙．变权重组合预测模型在短时交通流预测中的应用 [J]. 统计与决策，2010 (6)：168 - 169.
[92] 杨卓平，盖宇仙．基于变权重组合模型的铁路货运量预测 [J]. 铁道货运，2009 (1)：17 - 19.
[93] 张伟，廖益琴．基于变权重组合模型的中国股市波动率预测 [J]. 经济研究导刊，2010 (4)：27 - 28.
[94] 王成永，刘红．基于变权组合预测模型的临沂市 GDP 预测 [J]. 临沂师范学院学报，2008，30 (6)：134 - 136.
[95] 周帆．变权重组合预测法预测重庆市高考分数线 [J]. 科教文汇（上旬刊），2009 (9)：287 - 288.
[96] 赵明华，刘建华，陈炳初，等．边坡变形及失稳的变权重组合预测模型 [J]. 岩土力学，2007，28 (S1)：553 - 557.
[97] 吴清海，李惠芳．变权组合模型在沉降预测中的应用 [J]. 测绘科学技术学报，2009，26 (2)：118 - 120，124.
[98] Lee C C，Wan T J，Kuo C Y，et al. ESTIMATING AIR QUALITY IN A TRAFFIC TUNNEL USING A FORECASTING COMBINATION MODEL [J]. Environmental Monitoring and Assessment，2006，112 (1 - 3)：327 - 345.

[99] 李志涛，张宇峰，姚藩照，等．变权重组合预测模型在生活垃圾产量预测计算中的应用 [J]．南京工业大学学报（自然科学版），2009，31（2）：97-101.
[100] 刘建，刘丹．基于时间序列模型的隧道涌水量反演与预测 [J]．水文地质与工程地质，2009（6）：6-9.
[101] 罗耀军．降水时间序列挖掘模型的建立和应用 [J]．水电能源科学，2009，27（4）：19-21.
[102] 马岚，魏晓妹．石羊河下游民勤县地下水水位时间序列模拟 [J]．灌溉排水学报，2008，27（4）：89-91.
[103] 沈富可，张卫，常潘．应用时间序列分析进行网络负载预测 [J]．中山大学学报（自然科学版），2009，48（Sup.）：84-86.
[104] 杨武恒，郑耀星．福建省外国游客数量时间序列分析 [J]．今日科苑，2008，(20)：286.
[105] 林英，邹继锋，洪伟，等．时间序列分解模型在大坝变形预测中的应用 [J]．东北水利水电，2003，21（5）：3-4，55.
[106] 厉海涛．基于贝叶斯网络的动量轮可靠性建模与分析 [D]．长沙：国防科学技术大学，2007.
[107] 尤源，刘艳，刘成林．MATLAB 软件在传感器实验教学中的应用 [J]．中国现代教育装备，2010（3）：36-38.
[108] 周晓君，兰双双，王滨．时间序列分析在四平地区地下水水位预报中的应用 [J]．东北水利水电，2007，25（8）：35-37，42.
[109] 周文，曹琳．时间序列在干旱区棉花需水量预测中的应用 [J]．安徽农业科学，2008，36（23）：9815-9816，9822.
[110] 边浩毅，王怡民，李百川，等．基于灰色预测模型的公路运输量预测 [J]．江南大学学报（自然科学版），2006，5（6）：745-748.
[111] 任焕莲．基于残差修正的农灌需水量灰色预测 [J]．水文，2008，28（6）：12-14.
[112] 朱必勇．改进 GM（1，1）模型在我国石油消费量预测中的应用 [J]．现代矿业，2010（3）：84-87.
[113] 赵昕，李丹．基于灰色预测模型 GM（1，1）的海洋人才预测研究 [J]．海洋开发与管理，2010，27（1）：36-38.
[114] 王培玲，郭葆庆，索南．双向差分模型在中强震长趋势预测中的应用 [J]．高原地震，2001，13（2）：20-23.
[115] 刘淑娟，郭小春，李庆杰，等．灰色双向差分建模在作物产量预测中的应用 [J]．山东农业大学学报（自然科学版），2002，33（4）：486-490.
[116] 王君，王迪吉．应用等维新息双向差分灰色模型进行趋势分析的新发现 [J]．新疆师范大学学报（自然科学版），2005，24（2）：15-19.
[117] 程银才，李明．灰色双向差分模型在地下水动态预测中的应用 [J]．地下水，2008，30（1）：9-11.
[118] 唐建国，王大明，祝争艳，等．双向差分灰色模型在路面性能预测中的应用 [J]．森林工程，2009，25（1）：59-61，85.
[119] 吴兴华，周晖．基于残差周期修正的灰色电价预测模型 [J]．电网技术，2008，32（8）：67-70.
[120] 陈鸿文，陈志强．灰色新陈代谢 GM（1，1）模型在江门市年需水预测中的应用 [J]．广东水利水电，2007（6）：26-27.
[121] 赵文举，马孝义，李军利，等．灰色时序组合模型及其在地下水埋深预测中的应用 [J]．数学的实践与认识，2008，38（18）：70-76.
[122] 崔巍，王新民，杨策．变权组合预测模型在滑坡预测中的应用 [J]．吉林大学学报（信息科学版），2010，28（2）：172-176.



第六章　区域复杂季节降水序列多时间尺度变化特征分析

降水是区域农业生产、旱涝灾害形成的重要影响因子，同时也是地表水、地下水的重要补给来源[1,2]。建三江分局地处三江平原温和湿润气候区，属于大陆性季风气候，多年平均降水量为500～600mm[3]，降水年际变化大，年内分配很不均匀[4-6]。因此，研究建三江分局各分区复杂季节降水序列的多时间尺度变化特征，分析其旱涝变化规律，对于防灾减灾、地下水资源恢复与可持续利用及农业可持续发展具有重要的意义。

研究降水多时间尺度变化特征的传统方法主要有Fourier分析、谐波分析、功率谱分析、滤波分析、时间序列分析、滑动平均[7,8]等，这些方法在时域和频域上不具有局部化性质，对突变点的诊断缺乏数学上的严谨性[8,9]，因此不能全面反映降水的多时间尺度变化特征。而20世纪80年代初发展起来的小波分析是泛函分析、Fourier分析、样条分析、调和分析和数值分析的最完美的结晶[10,11]，它具有时频多分辨率功能和数学意义上的严格突变点分析功能，可以对信号进行多时间尺度细化分析[12,13]，因此优于上述传统方法，近些年来广泛应用于气候多时间尺度分析研究中。

第一节　小波分析基本原理

一、小波函数

小波函数是指具有震荡特性、能够迅速衰减到零的一类函数，即 $\int_{-\infty}^{+\infty}\psi(t)\mathrm{d}t=0$ [14]。小波函数有多种，在小波分析中经常采用Marr小波、Morlet小波、Wave小波、Mexican hat小波等[15-19]。本节选用在时域和频域局部性都较好的Morlet小波，其函数为[15,18,20-22]：

$$\psi(t)=\mathrm{e}^{ict}\mathrm{e}^{-t^2/2} \tag{6-1}$$

式中：c为常数；i为虚数。

Morlet小波是由一个周期函数经过Gaussian函数平滑而得到的，所以它的尺度因子a与傅里叶变换中的周期有一一对应的关系：$T=\left[\frac{4\pi}{(c+\sqrt{2+c^2})}\right]\times a$。当取常数$c=6.2$时，$T=1.00057a\approx a$，所以Morlet小波可以用来进行周期分析。

二、小波变换

小波变换是小波分析的核心。采用前述的连续小波变换或离散小波变换可以得到小波

变换系数 $W_f(a, b)$，根据 $W_f(a, b)$ 随频域参数 a 和时域参数 b 的变化，可以绘出以 b 为横坐标、a 为纵坐标的关于 $W_f(a, b)$ 的二维等值线图，称为小波变换系数图[23,24]。通过分析小波变换系数图，可以得到水文时间序列在小波变换域中的小波变化特征，从而揭示出水文时间序列的多时间尺度演变特征和突变特征。

三、小波方差

将时间域上关于 a 的所有小波变换系数的平方进行积分，即为小波方差。对于离散水文时间序列，小波方差可以采用式（6-2）[25-28]计算：

$$Var(a) = \frac{1}{n}\sum_{b=1}^{n} |W_f(a, b)|^2 \tag{6-2}$$

式中：n 为样本数；$|W_f(a, b)|^2$ 为小波变换系数模平方。

小波方差随尺度 a 变化的过程，称为小波方差图，该图能反映水文时间序列中所包含的各种尺度（即周期）的波动及其强弱（能量大小）随尺度变化的特性，图中各个峰值分别对应着各个显著周期。因此，通过小波方差图可以很方便地确定一个时间序列中存在的主要时间尺度（即主周期）[27,29,30]。

第二节　建三江分局北区复杂季节降水序列多时间尺度分析

由表 4-31 可以看出，建三江分局北区 3 个农场季节降水序列复杂性排序分别为③、⑫、⑩，其中，青龙山农场排序为③，在北区 3 个农场中复杂性排序最高。现以青龙山农场作为建三江分局北区的代表，对其季节及年降水实测序列资料进行多时间尺度分析，以了解其不同时间尺度下的详细结构和变化趋势。

一、资料处理

为处理方便，对青龙山农场 1970～2006 年春、夏、秋、冬四季及年降水（当年 3 月至次年 2 月）实测序列资料（$n=37$）进行距平（中心化）处理[31]，并绘制四季及年降水距平序列变化曲线，如图 6-1 所示。

二、北区复杂季节及年降水距平序列多时间尺度分析

（一）春季降水距平序列多时间尺度分析

1. 春季降水距平序列小波变换

根据式（3-27），编程计算青龙山农场春季降水距平序列 $f_1(k\Delta t)(k=1, 2, \cdots, 37; \Delta t=1)$ 的小波变换系数 $W_f(a, b)$。

由于 Morlet 小波属于复数小波，因此其小波变换系数包括实部和虚部两个部分。参考相关文献可知，小波变换的模平方与函数 $f_1(t)$ 在其小波变换域中的能量成正比，$|W_f(a, b)|^2$ 就是信号在 a、b 时的小波频谱能量，因此小波变换模平方就可以用来表示特征时间尺度信号能量的强弱。而不同特征时间尺度信号在不同时间上的分布和位相两方



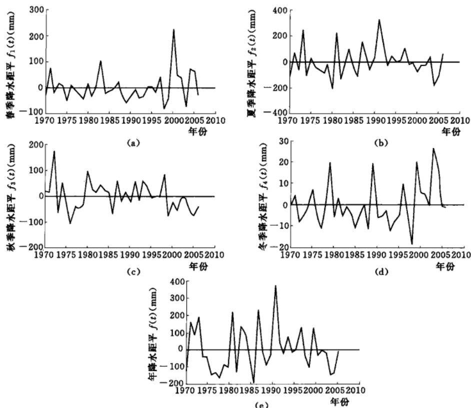


图 6-1　青龙山农场四季及年降水距平序列变化曲线（1970～2006 年）

面的信息则可以用小波变换的实部来表示[23,28]。因此，年降水距平序列小波变换系数 $W_f(a, b)$的模平方和实部就蕴含着序列随着时间尺度 a（即周期 T）和时移 b 而变化的特征信息[31,32]。

2. *春季降水距平序列时频分析*

按照前述方法绘制青龙山农场春季降水距平序列小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的模平方等值线图（见图 6-2）和实部等值线图（见图 6-3），在此基础上进行春季降水距平序列的时频变化分析。

（1）小波变换系数模平方时频特性分析。由图 6-2 可以看出不同时间尺度信号能量分布的强弱，其中 3～8 年时间尺度信号能量变化最强，主要发生 1980～1988 年、1994～2006 年，振荡中心在 1983 年和 2000 年；13～24 年时间尺度信号主要发生在 1978～2006 年；1～3 年时间尺度信号主要发生在 1970～1972 年、1988～1990 年及 1999～2004 年；其余时间尺度信号能量变化则较弱。

（2）小波变换系数实部时频特性分析。由图 6-3 可以看出不同时间尺度的变化、正负位相转变点的分布及其位相结构，其中，3～8 年、12～25 年时间尺度表现最为明显，正负位相交替出现，其中心时间尺度为 4 年和 17 年左右。另外，8～11 年时间尺度也有

表现，其中心时间尺度为 9 年左右。为了进一步说明青龙山农场春季降水距平序列旱、涝交替变化的波动特性，在图 6－3 上固定时间尺度 a 值（分别取 $a=4$、9、17），作平行于 b 轴的切割线，在切割线上取点，作小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的实部（表示为 $R[W_f(a, b)]$）随时移 b 变化的过程线，如图 6－4 所示。

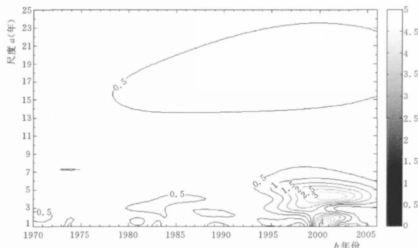


图 6－2　青龙山农场春季降水距平序列小波变换系数模平方（$\times 10^4$）等值线

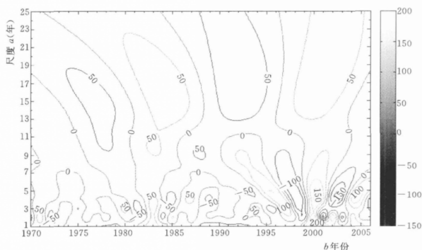


图 6－3　青龙山农场春季降水距平序列小波变换系数实部时频分布

图 6－4（a）给出了 4 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，降水量旱涝变化及正负位相转变点位置可以准确给出（限于篇幅，这里不具体给出）。图 6－4（b）给出了 9 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1971～1976 年、1981～1986 年、1991～1994 年、2000～2003 年为正位相，表示降水量偏多；而 1970 年、1977～1980 年、1987～1990

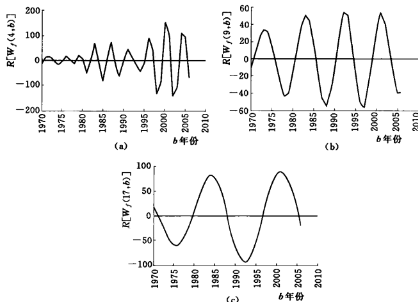


图 6-4　不同尺度下青龙山农场春季降水距平序列 Morlet 小波变换系数实部变化过程

年、1995～1999 年及 2004 年以后为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1971 年、1976 年、1981 年、1986 年、1990 年、1994 年、1999 年和 2003 年。图 6-4（c）给出了 17 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1972 年以前、1979～1988 年、1998～2005 年为正位相，表示降水量偏多；而 1973～1978 年、1989～1997 年及 2006 年为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1972 年、1979 年、1988 年、1997 年和 2005 年。

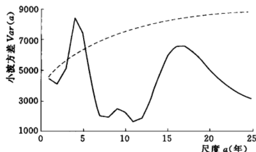


图 6-5　青龙山农场春季降水距平序列小波方差（实线为小波方差，虚线为 95%置信水平）

3. 春季降水序列主要周期分析

利用已经求解出来的不同尺度下的小波变换系数，按照前述方法，通过计算机编程，绘制青龙山农场春季降水距平序列小波方差图，如图 6-5 所示。从图 6-5 可以看出，小波方差的主要峰值分别出现在尺度 $a=4$、9、17 处，第一峰值为尺度 $a=4$ 所对应的小波方差，说明 4 年左右的周期振荡最强，为第一主周期，第二、第三主周期分别为 17 年和 9 年。为了识别上述主周期是否具有统计意义，还需要进行显著性检验。

小波方差是否显著，可以采用红噪声或白噪声标准谱进行检验。究竟选用哪一种标准谱，可采用式（6-3）进行判别[33]：

$$r_c=\frac{-1+1.645\sqrt{n-2}}{n-1} \tag{6-3}$$

若原序列滞后 1 的自相关系数 $r(1)>r_c$，则用红噪声谱检验；否则，则令 $r(1)=0$，用白噪声谱检验。具体检验公式如下[34-36]：

$$P_a=\frac{1-r(1)^2}{1+r(1)^2-2r(1)\cos\left(\frac{2\pi\Delta t}{1.033a}\right)} \tag{6-4}$$

式中：P_a 为红噪声或白噪声标准谱［$r(1)=0$ 时为白噪声标准谱］；$r(1)$ 为原序列滞后 1 的自相关系数；Δt 为原序列时间间隔。

$$P=\sigma^2 P_a \frac{\chi_\nu^2}{\nu} \tag{6-5}$$

式中：P 为小波理论功率谱；σ^2 为原序列方差；χ_ν^2 为显著性水平 $\alpha=0.05$、自由度为 ν 时的 χ^2 分布值，其中，$\nu=2\sqrt{1+\left(\frac{n\Delta t}{2.32a}\right)^2}$。

若 $Var(a)>P$，则说明小波方差所对应的周期是显著的。

经过计算，青龙山农场春季降水序列的一阶自相关系数 $r(1)=-0.0380$，再根据式（6－3）计算 r_c，$r_c=\frac{-1+1.645\sqrt{37-2}}{37-1}=0.2426>r(1)$，所以采用白噪声谱对小波方差进行检验，如图 6－5 所示。由图 6－5 可以看出，只有 4 年左右的周期超过了 95％置信水平，因此，青龙山农场春季降水序列真正的主周期为 4 年左右。17 年左右的周期虽然没有通过显著性检验，但其小波方差峰值也比较突出。9 年左右的小波方差虽然也具有一定峰值，但已不明显。

4. *春季降水序列变化趋势分析*

图 6－4 已经给出不同尺度下小波变换系数实部变化过程，通过图 6－4 即可分析出各主要时间尺度下青龙山农场春季降水序列的变化趋势。分析较小尺度 4 年和 9 年的变化趋势可以看出，2007～2008 年，青龙山农场春季降水量将处于偏少期，而 2009 年以后将进入降水偏多期；分析较大尺度 17 年的变化趋势可以看出，2007～2014 年，青龙山农场春季降水量将处于偏少期，而 2015 年以后的 8 年内，青龙山农场春季降水量将处于偏多期。

（二）夏季降水距平序列多时间尺度分析

1. *夏季降水距平序列小波变换*

根据式（3－27），编程计算青龙山农场夏季降水距平序列 $f_2(k\Delta t)$（$k=1, 2, \cdots, 37$；$\Delta t=1$）的小波变换系数 $W_f(a, b)$。

2. *夏季降水距平序列时频分析*

按照前述方法绘制青龙山农场夏季降水距平序列小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的模平方等值线图（见图 6－6）和实部等值线图（见图 6－7），在此基础上进行夏季降水距平序列的时频变化分析。

（1）小波变换系数模平方时频特性分析。由图 6－6 可以看出不同时间尺度信号能量分布的强弱，其中 1～6 年时间尺度信号能量变化最强，主要发生在 1970～2006 年，振荡中心在 1973 年和 1981 年；17～25 年时间尺度信号能量变化也较强，主要发生在 1970～2006 年，振荡中心在 1991 年；8～10 年时间尺度信号主要发生在 1974～1989 年；1～2 年时间尺度信号主要发生在 1990～1993 年、2003～2005 年；其余时间尺度信号能量变化则较弱。

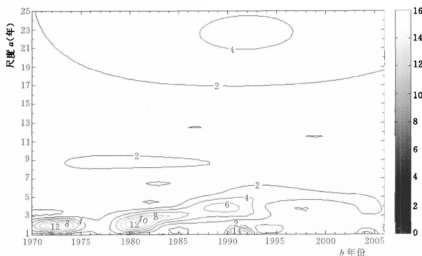


图 6-6　青龙山农场夏季降水距平序列小波变换系数模平方（$\times10^4$）等值线

（2）小波变换系数实部时频特性分析。由图 6-7 可以看出不同时间尺度的变化、正负位相转变点的分布及其位相结构，其中，1～6 年、17～25 年时间尺度表现最为明显，正负位相交替出现，其中心时间尺度为 2 年和 23 年左右。另外，8～10 年时间尺度也有表现，其中心时间尺度为 9 年左右。为了进一步说明青龙山农场夏季降水距平序列旱、涝交替变化的波动特性，在图 6-7 上固定时间尺度 a 值（分别取 $a=2$、9、23），作平行于 b 轴的切割线，在切割线上取点，作小波变换系数 $W_f(a, b)$的实部（表示为 $R[W_f(a, b)]$）随时移 b 变化的过程线，如图 6-8 所示。

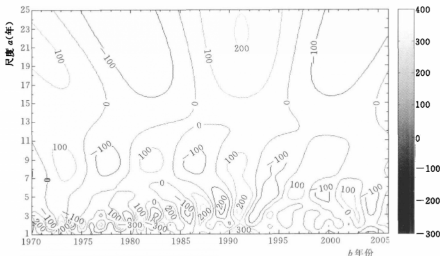


图 6-7　青龙山农场夏季降水距平序列小波变换系数实部时频分布

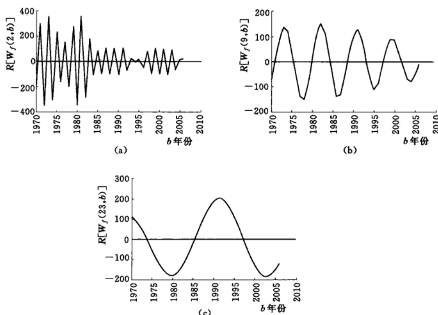


图 6-8　不同尺度下青龙山农场夏季降水距平序列 Morlet 小波变换系数实部变化过程

图 6-8（a）给出了 2 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，降水量旱涝变化及正负位相转变点位置可以准确给出（限于篇幅，这里不具体给出）。图 6-8（b）给出了 9 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1971～1976 年、1981～1984 年、1990～1993 年、1998～2002 年为正位相，表示降水量偏多；而 1970 年、1977～1980 年、1985～1989 年、1994～1997 年及 2003 年以后为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1971 年、1976 年、1980 年、1984 年、1989 年、1993 年、1998 年和 2002 年。图 6-8（c）给出了 23 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1973 年以前、1986～1997 年为正位相，表示降水量偏多；而 1974～1985 年及 1998 年以后为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1974 年、1986 年和 1997 年。

3. *夏季降水序列主要周期分析*

利用已经求解出来的不同尺度下的小波变换系数，按照前述方法，通过计算机编程，绘制青龙山农场夏季降水距平序列小波方差图，如图 6-9 所示。从图 6-9 可以看出，小波方差的主要峰

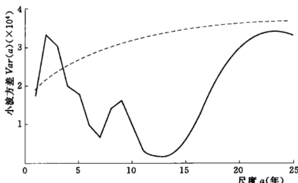


图 6-9　青龙山农场夏季降水距平序列小波方差
（实线为小波方差，虚线为 95%置信水平）

值分别出现在尺度 $a=2$、9、23 处，第一峰值为尺度 $a=2$ 所对应的小波方差，说明 2 年左右的周期振荡最强，为第一主周期，第二、第三主周期分别为 23 年和 9 年。为了识别上述主周期是否具有统计意义，还需要进行显著性检验。

经过计算，青龙山农场夏季降水序列的一阶自相关系数 $r(1)=-0.1711<r_c=0.2426$，所以采用白噪声谱对小波方差进行检验，如图 6-9 所示。由图 6-9 可以看出，只有 2 年左右的周期超过了 95%置信水平，因此，青龙山农场夏季降水序列真正的主周期为 2 年左右。23 年左右的周期虽然没有通过显著性检验，但其小波方差峰值也比较突出。9 年左右的小波方差虽然也具有一定峰值，但已不明显。

4. 夏季降水序列变化趋势分析

图 6-8 已经给出不同尺度下小波变换系数实部变化过程，通过图 6-8 即可分析出各主要时间尺度下青龙山农场夏季降水序列的变化趋势。分析较小尺度 2 年和 9 年的变化趋势可以看出，2007 年左右，青龙山农场夏季降水量将处于偏多期，而 2012 年以后将进入降水偏少期；分析较大尺度 23 年的变化趋势可以看出，2007～2009 年，青龙山农场夏季降水量将处于偏少期，而 2010 年以后的 11 年内，青龙山农场夏季降水量将处于偏多期。

（三）秋季降水距平序列多时间尺度分析

1. 秋季降水距平序列小波变换

根据式（3-27），编程计算青龙山农场秋季降水距平序列 $f_3(k\Delta t)(k=1, 2, \cdots, 37; \Delta t=1)$ 的小波变换系数 $W_f(a, b)$。

2. 秋季降水距平序列时频分析

按照前述方法绘制青龙山农场秋季降水距平序列小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的模平方等值线图（见图 6-10）和实部等值线图（见图 6-11），在此基础上进行秋季降水距平序列的时频变化分析。

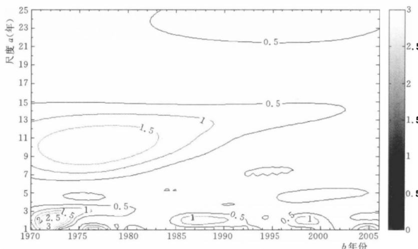


图 6-10 青龙山农场秋季降水距平序列小波变换系数模平方（$\times 10^4$）等值线

(1) 小波变换系数模平方时频特性分析。由图 6－10 可以看出不同时间尺度信号能量分布的强弱，其中 1～4 年时间尺度信号能量变化最强，主要发生在 1970～1981 年、1985～1994 年及 1996～2001 年，振荡中心在 1972 年、1987 年和 1998 年；7～15 年时间尺度信号能量变化也较强，主要发生在 1970～2002 年，振荡中心在 1980 年；21～25 年时间尺度信号主要发生在 1982～2006 年；1～2 年时间尺度信号主要发生在 1975～1978 年、1980～1982 年及 2003～2006 年；其余时间尺度信号能量变化则较弱。

(2) 小波变换系数实部时频特性分析。由图 6－11 可以看出不同时间尺度的变化、正负位相转变点的分布及其位相结构，其中，1～4 年、7～15 年时间尺度表现最为明显，正负位相交替出现，其中心时间尺度为 2 年和 12 年左右。另外，21～25 年时间尺度也有表现，其中心时间尺度为 24 年左右。为了进一步说明青龙山农场秋季降水距平序列旱、涝交替变化的波动特性，在图 6－11 上固定时间尺度 a 值（分别取 $a=2$、12、24），作平行于 b 轴的切割线，在切割线上取点，作小波变换系数 $W_f(a,b)$ 的实部（表示为 $R[W_f(a,b)]$）随时移 b 变化的过程线，如图 6－12 所示。

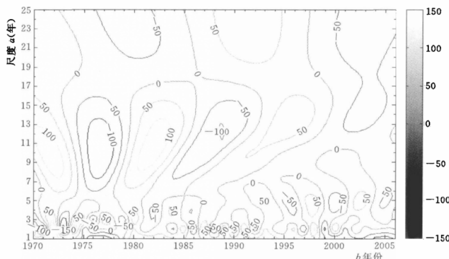


图 6－11　青龙山农场秋季降水距平序列小波变换系数实部时频分布

图 6－12 (a) 给出了 2 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，降水量旱涝变化及正负位相转变点位置可以准确给出（限于篇幅，这里不具体给出）。图 6－12 (b) 给出了 12 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1973 年以前、1980～1986 年、1993～1998 年及 2006 年为正位相，表示降水量偏多；而 1974～1979 年、1987～1992 年、1999～2005 年为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1973 年、1979 年、1986 年、1992 年、1998 年和 2005 年。图 6－12 (c) 给出了 24 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1973 年以前、1986～1997 年为正位相，表示降水量偏多；而 1974～1985 年及 1998 年以后为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1973 年、1986 年和 1997 年。

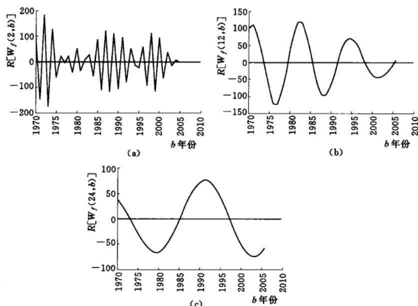


图 6-12　不同尺度下青龙山农场秋季降水距平序列 Morlet 小波变换系数实部变化过程

3. 秋季降水序列主要周期分析

利用已经求解出来的不同尺度下的小波变换系数，按照前述方法，通过计算机编程，绘制青龙山农场秋季降水距平序列小波方差图，如图 6-13 所示。从图 6-13 可以看出，小波方差的主要峰值分别出现在尺度 $a=2$、12、24 处，第一峰值为尺度 $a=12$ 所对应的小波方差，说明 12 年左右的周期振荡最强，为第一主周期，第二、第三主周期分别为 2 年和 24 年。为了识别上述主周期是否具有统计意义，还需要进行显著性检验。

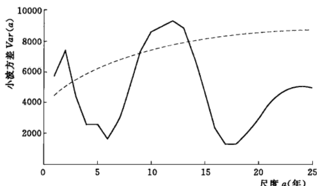


图 6-13　青龙山农场秋季降水距平序列小波方差
（实线为小波方差，虚线为 95%置信水平）

经过计算，青龙山农场秋季降水序列的一阶自相关系数 $r(1)=-0.0487<r_c=0.2426$，所以采用白噪声谱对小波方差进行检验，如图 6-13 所示。由图 6-13 可以看

出，只有2年和12年左右的周期超过了95%置信水平，因此，青龙山农场秋季降水序列真正的主周期为2年和12年左右。24年左右的小波方差虽然也具有一定峰值，但已不明显。

4. 秋季降水序列变化趋势分析

图6-12已经给出不同尺度下小波变换系数实部变化过程，通过图6-12即可分析出各主要时间尺度下青龙山农场秋季降水序列的变化趋势。分析较小尺度2年和12年的变化趋势可以看出，2007年左右，青龙山农场秋季降水量将处于偏多期，而2011年以后将进入降水偏少期；分析较大尺度24年的变化趋势可以看出，2007～2010年，青龙山农场秋季降水量将处于偏少期，而2011年以后的11年内，青龙山农场秋季降水量将处于偏多期。

（四）冬季降水距平序列多时间尺度分析

1. 冬季降水距平序列小波变换

根据式（3-27），编程计算青龙山农场冬季降水距平序列 $f_4(k\Delta t)(k=1, 2, \cdots, 37; \Delta t=1)$ 的小波变换系数 $W_f(a, b)$。

2. 冬季降水距平序列时频分析

按照前述方法绘制青龙山农场冬季降水距平序列小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的模平方等值线图（见图6-14）和实部等值线图（见图6-15），在此基础上进行冬季降水距平序列的时频变化分析。

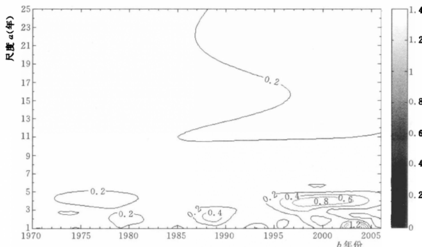


图6-14　青龙山农场冬季降水距平序列小波变换系数模平方（$\times 10^3$）等值线

（1）小波变换系数模平方时频特性分析。由图6-14可以看出不同时间尺度信号能量分布的强弱，其中3～5年时间尺度信号能量变化最强，主要发生在1972～1981年和1994～2006年，振荡中心在1979年和1999年；11～25年时间尺度信号主要发生在1985～2006年；1～3年时间尺度信号主要发生在1978～1982年、1986～1991年及2002～2005年；其余时间尺度信号能量变化则较弱。

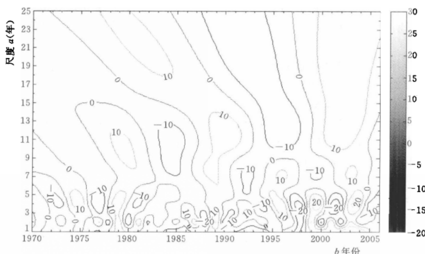


图 6-15　青龙山农场冬季降水距平序列小波变换系数实部时频分布

（2）小波变换系数实部时频特性分析。由图 6-15 可以看出不同时间尺度的变化、正负位相转变点的分布及其位相结构，其中，3～5 年时间尺度表现最为明显，正负位相交替出现，其中心时间尺度为 4 年左右。另外，7～14 年、11～25 年、7～9 年时间尺度也有表现，其中心时间尺度为 12 年、22 年和 8 年左右。为了进一步说明青龙山农场冬季降水距平序列旱、涝交替变化的波动特性，在图 6-15 上固定时间尺度 a 值（分别取 $a=2$、8、12、24），作平行于 b 轴的切割线，在切割线上取点，作小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的实部（表示为 $R[W_f(a, b)]$）随时移 b 变化的过程线，如图 6-16 所示。

图 6-16（a）给出了 4 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，降水量旱涝变化及正负位相转变点位置可以准确给出（限于篇幅，这里不具体给出）。图 6-16（b）给出了 8 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1974 年以前、1979～1982 年、1987～1990 年、1995～1998 年、2002～2005 年为正位相，表示降水量偏多；而 1975～1978 年、1983～1986 年、1991～1994 年、1999～2001 年及 2006 年为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1974 年、1978 年、1982 年、1986 年、1990 年、1994 年、1998 年、2001 年和 2005 年。图 6-16（c）给出了 12 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1976～1981 年、1988～1993 年、2000～2005 年为正位相，表示降水量偏多；而 1975 年以前、1982～1987 年、1994～1999 年及 2006 年为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1976 年、1981 年、1987 年、1993 年、1999 年和 2005 年。图 6-16（d）给出了 22 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1976～1986 年及 1998 年以后为正位相，表示降水量偏多；而 1975 年以前、1987～1997 年为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1975 年、1986 年和 1997 年。

（3）冬季降水序列主要周期分析。利用已经求解出来的不同尺度下的小波变换系数，按照前述方法，通过计算机编程，绘制青龙山农场冬季降水距平序列小波方差图，如图 6

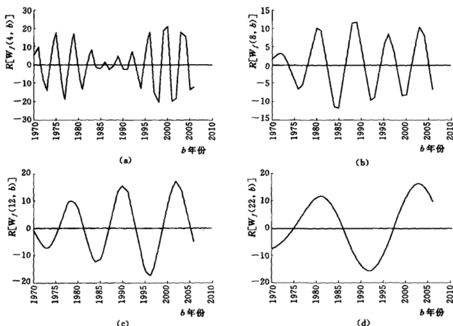


图 6-16　不同尺度下青龙山农场冬季降水距平序列 Morlet 小波变换系数实部变化过程

-17 所示。从图 6-17 可以看出，小波方差的主要峰值分别出现在尺度 $a=4$，8，12，22 处，第一峰值为尺度 $a=4$ 所对应的小波方差，说明 4 年左右的周期振荡最强，为第一主周期，第二、第三、第四主周期分别为 12 年、22 年和 8 年。为了识别上述主周期是否具有统计意义，还需要进行显著性检验。

经过计算，青龙山农场冬季降水序列的一阶自相关系数 $r(1)=0.0201<r_c=0.2426$，所以采用白噪声谱对小波方差进行检验，如图 6-17 所示。由图 6-17 可以看出，只有 4 年左右的周期超过了 95%置信水平，因此，青龙山农场冬季降水序列真正的主周期为 4

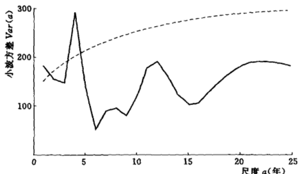


图 6-17　青龙山农场冬季降水距平序列小波方差
（实线为小波方差，虚线为 95%置信水平）

年左右。12年和22年左右的周期虽然没有通过显著性检验，但其小波方差峰值也比较突出。8年左右的小波方差虽然也具有一定峰值，但已不明显。

（4）冬季降水序列变化趋势分析。图6-16已经给出不同尺度下小波变换系数实部变化过程，通过图6-16即可分析出各主要时间尺度下青龙山农场冬季降水序列的变化趋势。分析较小尺度4年、8年和12年的变化趋势可以看出，2007年左右，青龙山农场冬季降水量将处于偏少期，而2012年以后将进入降水偏多期；分析较大尺度22年的变化趋势可以看出，2007～2008年，青龙山农场冬季降水量将处于偏多期，而2009年以后的11年内，青龙山农场冬季降水量将处于偏少期。

（五）年降水距平序列多时间尺度分析

1. 年降水距平序列小波变换

根据式（3-27），编程计算青龙山农场年降水距平序列 $f(k\Delta t)$（$k=1, 2, \cdots, 37$；$\Delta t=1$）的小波变换系数 $W_f(a, b)$。

2. 年降水距平序列时频分析

按照前述方法绘制青龙山农场年降水距平序列小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的模平方等值线图（见图6-18）和实部等值线图（见图6-19），在此基础上进行年降水距平序列的时频变化分析。

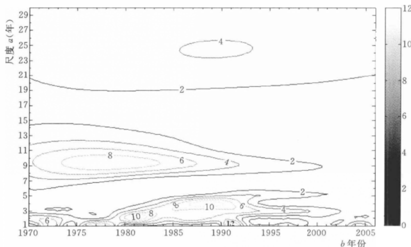


图6-18　青龙山农场年降水距平序列小波变换系数模平方（$\times10^4$）等值线

（1）小波变换系数模平方时频特性分析。由图6-18可以看出不同时间尺度信号能量分布的强弱，其中2～5年时间尺度信号能量变化最强，主要发生在1979～1994年，振荡中心在1981年和1987年；6～14年时间尺度信号能量变化也较强，主要发生在1970～2000年，振荡中心在1981年；19～30年时间尺度信号主要发生在1970～2006年；1～2年时间尺度信号主要发生在1970～1992年、2003～2006年；其余时间尺度信号能量变化则较弱。

（2）小波变换系数实部时频特性分析。由图6-19可以看出不同时间尺度的变化、正

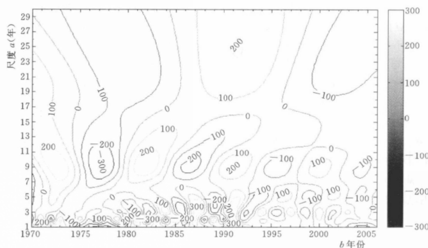


图 6-19　青龙山农场年降水距平序列小波变换系数实部时频分布

负位相转变点的分布及其位相结构，其中，2～5 年、6～14 年时间尺度表现最为明显，正负位相交替出现，其中心时间尺度为 3 年和 9 年左右。另外，19～30 年时间尺度也有表现，其中心时间尺度为 25 年左右。为了进一步说明青龙山农场年降水距平序列旱、涝交替变化的波动特性，在图 6-19 上固定时间尺度 a 值（分别取 $a=3$、9、25），作平行于 b 轴的切割线，在切割线上取点，作小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的实部（表示为 $R[W_f(a, b)]$）随时移 b 变化的过程线，如图 6-20 所示。

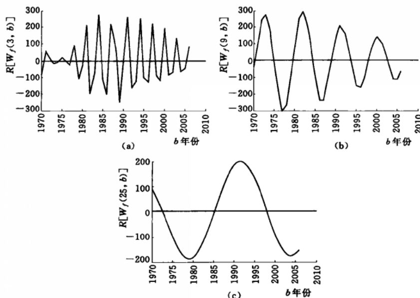


图 6-20　不同尺度下青龙山农场年降水距平序列 Morlet 小波变换系数实部变化过程

图 6-20（a）给出了 3 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，降水量旱涝变化及正负位相转变点位置可以准确给出（限于篇幅，这里不具体给出）。图 6-20（b）给出了 9 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1971～1975 年、1980～1984 年、1990～1993 年、1999～2002 年为正位相，表示降水量偏多；而 1970 年、1976～1979 年、1985～1989 年、1994～1998 年及 2003 年以后为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1971 年、1975 年、1979 年、1984 年、1989 年、1993 年、1998 年和 2002 年。图 6-20（c）给出了 25 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1972 年以前、1986～1998 年为正位相，表示降水量偏多；而 1973～1985 年及 1999 年以后为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1973 年、1985 年和 1998 年。

3. 年降水序列主要周期分析

利用已经求解出来的不同尺度下的小波变换系数，按照前述方法，通过计算机编程，绘制青龙山农场年降水距平序列小波方差图，如图 6-21 所示。从图 6-21 可以看出，小波方差的主要峰值分别出现在尺度 $a=3$，9，25 处，第一峰值为尺度 $a=9$ 所对应的小波方差，说明 9 年左右的周期振荡最强，为第一主周期，第二、第三主周期分别为 3 年和 25 年。为了识别上述主周期是否具有统计意义，还需要进行显著性检验。

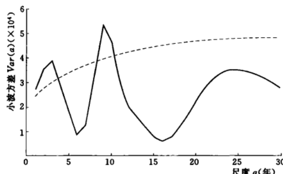


图 6-21 青龙山农场年降水距平序列小波方差
（实线为小波方差，虚线为 95%置信水平）

经过计算，青龙山农场年降水序列的一阶自相关系数 $r(1)=-0.0296<r_c=0.2426$，所以采用白噪声谱对小波方差进行检验，如图 6-21 所示。由图 6-21 可以看出，只有 3 年和 9 年左右的周期超过了 95%置信水平，因此，青龙山农场年降水序列真正的主周期为 3 年和 9 年左右。25 年左右的周期虽然没有通过显著性检验，但其小波方差峰值也比较突出。

4. 年降水序列变化趋势分析

图 6-20 已经给出不同尺度下小波变换系数实部变化过程，通过图 6-20 即可分析出各主要时间尺度下青龙山农场年降水序列的变化趋势。分析较小尺度 3 年和 9 年的变化趋势可以看出，2007 年左右，青龙山农场年降水量将处于偏多期，而 2012 年以后将进入降水偏少期；分析较大尺度 25 年的变化趋势可以看出，2007～2010 年左右，青龙山农场年降水量将处于偏少期，而 2011 年以后的 13 年内，青龙山农场年降水量将处于偏多期。

三、北区复杂降水序列多时间尺度变化特征统计分析

结合前述分析结果，对青龙山农场各季节及年降水序列多时间尺度变化特征进行统计，见表 6-1。

表 6-1　　青龙山农场不同降水序列多时间尺度变化特征

降水序列	主周期	显著主周期	小尺度变化趋势	大尺度变化趋势
春季	4年、17年和9年	4年左右	2007～2008年，偏少期；2009年以后，偏多期	2007～2014年，偏少期；2015年以后的8年内，偏多期
夏季	2年、23年和9年	2年左右	2007年左右，偏多期；2012年以后，偏少期	2007～2009年，偏少期；2010年以后的11年内，偏多期
秋季	12年、2年和24年	2年和12年左右	2007年左右，偏多期；2011年以后，偏少期	2007～2010年，偏少期；2011年以后的11年内，偏多期
冬季	4年、12年、22年和8年	4年左右	2007年左右，偏少期；2012年以后，偏多期	2007～2008年，偏多期；2009年以后的11年内，偏少期
全年	9年、3年和25年	3年和9年左右	2007年左右，偏多期；2012年以后，偏少期	2007～2010年，偏少期；2011年以后的13年内，偏多期

由表6-1可以看出，青龙山农场夏、秋两季降水序列与年降水序列具有相似的主周期，且小尺度、大尺度变化趋势大致相同，因此，该地区夏、秋两季降水共同控制着全年降水。

第三节　建三江分局中区复杂季节降水序列多时间尺度分析

由表4-31可以看出，建三江分局中区5个农场季节降水序列复杂性排序分别为①、⑤、⑪、⑭、⑦，其中，前进农场排序为①，在中区5个农场中复杂性排序最高。现以前进农场作为建三江分局中区的代表，对其季节及年降水实测序列资料进行多时间尺度分析，以了解其不同时间尺度下的详细结构和变化趋势。

一、资料处理

为处理方便，对前进农场1972～2006年春、夏、秋、冬四季及年降水（当年3月至次年2月）实测序列资料（$n=35$）进行距平（中心化）处理，并绘制四季及年降水距平序列变化曲线，如图6-22所示。

二、中区复杂季节及年降水距平序列多时间尺度分析

（一）春季降水距平序列多时间尺度分析

1. 春季降水距平序列小波变换

根据式（3-27），编程计算前进农场春季降水距平序列 $f_1(k\Delta t)$（$k=1, 2, \cdots, 35$；$\Delta t=1$）的小波变换系数 $W_f(a, b)$。

2. 春季降水距平序列时频分析

按照前述方法绘制前进农场春季降水距平序列小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的模平方等值线图（见图6-23）和实部等值线图（见图6-24），在此基础上进行春季降水距平序列的时频变化分析。

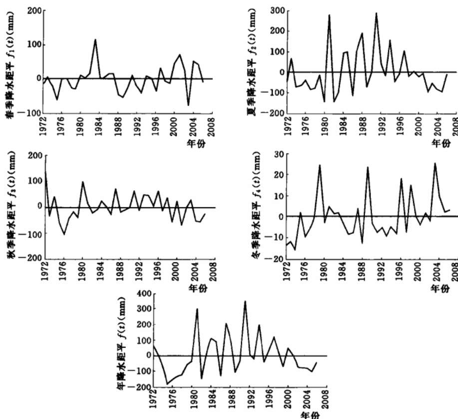


图 6-22　前进农场四季及年降水距平序列变化曲线（1972～2006 年）

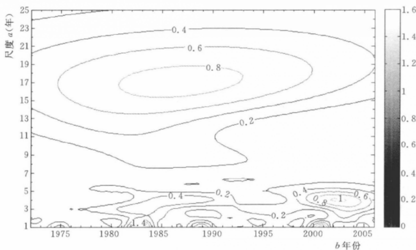


图 6-23　前进农场春季降水距平序列小波变换系数模平方（×10⁴）等值线

（1）小波变换系数模平方时频特性分析。由图 6-23 可以看出不同时间尺度信号能量分布的强弱，其中 2～5 年时间尺度信号能量变化最强，主要发生在 1981～1990 年、1998～2006 年，振荡中心在 1983 年和 2004 年；8～25 年时间尺度信号能量变化也较强，主要发生在 1972～2006 年，振荡中心在 1987 年；1～2 年时间尺度信号主要发生在 1974～1976 年、1981～1984 年、1987～1990 年、2000～2002 年及 2004～2005 年；其余时间尺度信号能量变化则较弱。

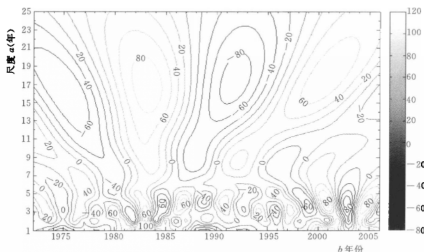


图 6-24　前进农场春季降水距平序列小波变换系数实部时频分布

（2）小波变换系数实部时频特性分析。由图 6-24 可以看出不同时间尺度的变化、正负位相转变点的分布及其位相结构，其中，2～5 年、8～25 年时间尺度表现最为明显，正负位相交替出现，其中心时间尺度为 4 年和 17 年左右。为了进一步说明前进农场春季降水距平序列旱、涝交替变化的波动特性，在图 6-24 上固定时间尺度 a 值（分别取 $a=4$、17），作平行于 b 轴的切割线，在切割线上取点，作小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的实部（表示为 $R[W_f(a, b)]$）随时移 b 变化的过程线，如图 6-25 所示。

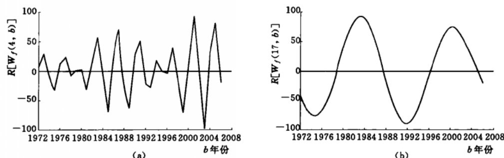


图 6-25　不同尺度下前进农场春季降水距平序列 Morlet 小波变换系数实部变化过程

图 6-25（a）给出了 4 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，降水量旱涝变化及正负位相转变点位置可以准确给出（限于篇幅，这里不具体给出）。图 6-25（b）给出了 17 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1980～1988 年、1997～2005 年为正位相，表示降水量偏多；而 1979 年以前、1989～1996 年及 2006 年为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1979 年、1988 年、1996 年和 2005 年。

3. 春季降水序列主要周期分析

利用已经求解出来的不同尺度下的小波变换系数，按照前述方法，通过计算机编程，绘制前进农场春季降水距平序列小波方差图，如图 6-26 所示。从图 6-26 可以看出，小波方差的主要峰值分别出现在尺度 $a=4$、17 处，第一峰值为尺度 $a=17$ 所对应的小波方差，说明 17 年左右的周期振荡最强，为第一主周期，第二主周期为 4 年。为了识别上述主周期是否具有统计意义，还需要进行显著性检验。

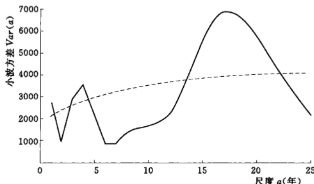


图 6-26　前进农场春季降水距平序列小波方差
（实线为小波方差，虚线为 95%置信水平）

经过计算，前进农场春季降水序列的一阶自相关系数 $r(1)=0.1296$，再根据式（6-3）计算 r_c，$r_c=\dfrac{-1+1.645\times\sqrt{35-2}}{35-1}=0.2485>r(1)$，所以采用白噪声谱对小波方差进行检验，如图 6-26 所示。由图 6-26 可以看出，4 年和 17 年左右的周期均超过了 95%置信水平，因此，前进农场春季降水序列真正的主周期为 4 年和 17 年左右。

4. 春季降水序列变化趋势分析

图 6-25 已经给出不同尺度下小波变换系数实部变化过程，通过图 6-25 即可分析出各主要时间尺度下前进农场春季降水序列的变化趋势。分析较小尺度 4 年的变化趋势可以看出，2007～2008 年，前进农场春季降水量将处于偏少期，而 2009 年以后将进入降水偏多期；分析较大尺度 17 年的变化趋势可以看出，2007～2013 年，前进农场春季降水量将处于偏少期，而 2014 年以后的 9 年内，前进农场春季降水量将处于偏多期。

（二）夏季降水距平序列多时间尺度分析

1. 夏季降水距平序列小波变换

根据式（3-27），编程计算前进农场夏季降水距平序列 $f_2(k\Delta t)$（$k=1, 2, \cdots, 35$；

$\Delta t=1$）的小波变换系数 $W_f(a, b)$。

2. 夏季降水距平序列时频分析

按照前述方法绘制前进农场夏季降水距平序列小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的模平方等值线图（见图 6－27）和实部等值线图（见图 6－28），在此基础上进行夏季降水距平序列的时频变化分析。

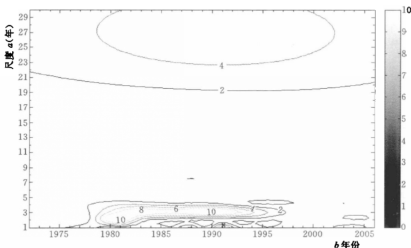


图 6－27 前进农场夏季降水距平序列小波变换系数模平方（×10⁴）等值线

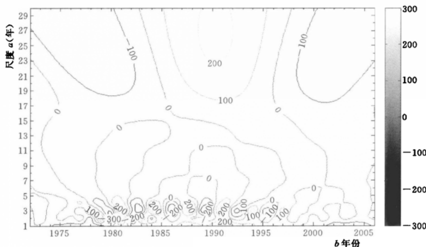


图 6－28 前进农场夏季降水距平序列小波变换系数实部时频分布

（1）小波变换系数模平方时频特性分析。由图 6－27 可以看出不同时间尺度信号能量分布的强弱，其中 1～4 年时间尺度信号能量变化最强，主要发生在 1979～1996 年，振荡中心在 1981 年和 1991 年；19～30 年时间尺度信号能量变化也较强，主要发生在 1972～

2006 年，振荡中心在 1991 年；1～2 年时间尺度信号主要发生在 1987～1989 年、1990～1993 年及 2002～2005 年；其余时间尺度信号能量变化则较弱。

(2) 小波变换系数实部时频特性分析。由图 6-28 可以看出不同时间尺度的变化、正负位相转变点的分布及其位相结构，其中，1～4 年、19～30 年时间尺度表现最为明显，正负位相交替出现，其中心时间尺度为 3 年和 27 年左右。为了进一步说明前进农场夏季降水距平序列旱、涝交替变化的波动特性，在图 6-28 上固定时间尺度 a 值（分别取 $a=4$，17)，作平行于 b 轴的切割线，在切割线上取点，作小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的实部（表示为 $R[W_f(a, b)]$）随时移 b 变化的过程线，如图 6-29 所示。

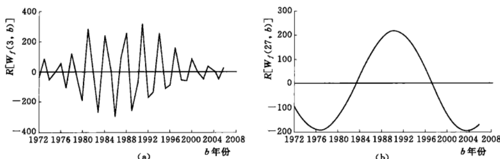


图 6-29　不同尺度下前进农场夏季降水距平序列 Morlet 小波变换系数实部变化过程

图 6-29 (a) 给出了 3 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，降水量旱涝变化及正负位相转变点位置可以准确给出（限于篇幅，这里不具体给出）。图 6-29 (b) 给出了 27 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1984～1997 年为正位相，表示降水量偏多；而 1983 年以前及 1998 年以后为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1983 年和 1997 年。

3. *夏季降水序列主要周期分析*

利用已经求解出来的不同尺度下的小波变换系数，按照前述方法，通过计算机编程，绘制前进农场夏季降水距平序列小波方差图，如图 6-30 所示。从图 6-30 可以看出，小波方差的主要峰值分别出现在尺度 $a=3$，27 处，第一峰值为尺度 $a=3$ 所对应的小波方差，说明 3 年左右的周期振荡最强，为第一主周期，第二主周期为 27 年。为了识别上述主周期是否具有统计意义，还需要进行显著性检验。

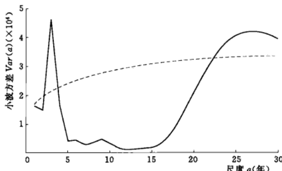


图 6-30　前进农场夏季降水距平序列小波方差
（实线为小波方差，虚线为 95%置信水平）

经过计算，前进农场夏季降水序列的一阶自相关系数 $r(1)=-0.1312<r_c=0.2485$，所以采用白噪声谱对小波方差进行检验，如图 6-30 所示。由图 6-30 可以看出，3 年和 27 年左右的周期均超过了 95%置信水平，因此，前进农场夏季降

水序列真正的主周期为 3 年和 27 年左右。

4. 夏季降水序列变化趋势分析

图 6-29 已经给出不同尺度下小波变换系数实部变化过程，通过图 6-29 即可分析出各主要时间尺度下前进农场夏季降水序列的变化趋势。分析较小尺度 3 年的变化趋势可以看出，2007 年左右，前进农场夏季降水量将处于偏多期，而 2008 年以后将进入降水偏少期；分析较大尺度 27 年的变化趋势可以看出，2007～2010 年左右，前进农场夏季降水量将处于偏少期，而 2011 年以后的 14 年内，前进农场春季降水量将处于偏多期。

（三）秋季降水距平序列多时间尺度分析

1. 秋季降水距平序列小波变换

根据式（3-27），编程计算前进农场秋季降水距平序列 $f_3(k\Delta t)$（$k=1, 2, \cdots, 35$；$\Delta t=1$）的小波变换系数 $W_f(a, b)$。

2. 秋季降水距平序列时频分析

按照前述方法绘制前进农场秋季降水距平序列小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的模平方等值线图（见图 6-31）和实部等值线图（见图 6-32），在此基础上进行秋季降水距平序列的时频变化分析。

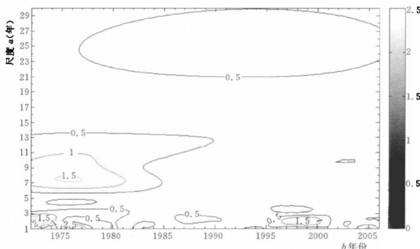


图 6-31　前进农场秋季降水距平序列小波变换系数模平方（$\times10^4$）等值线

（1）小波变换系数模平方时频特性分析。由图 6-31 可以看出不同时间尺度信号能量分布的强弱，其中 1～3 年时间尺度信号能量变化最强，主要发生在 1972～1981 年、1986～1991 年、1995～2001 年，振荡中心在 1972 年、1987 年和 1998 年；6～14 年时间尺度信号能量变化也较强，主要发生在 1972～1990 年，振荡中心在 1974 年；21～30 年时间尺度信号主要发生在 1977～2006 年；其余时间尺度信号能量变化则较弱。

（2）小波变换系数实部时频特性分析。由图 6-32 可以看出不同时间尺度的变化、正负位相转变点的分布及其位相结构，其中，1～3 年、6～14 年时间尺度表现最为明显，正负位相交替出现，其中心时间尺度为 2 年和 7 年左右。另外，10～15 年、21～30 年时间

尺度也有表现，其中心时间尺度为12年和25年左右。为了进一步说明前进农场秋季降水距平序列旱、涝交替变化的波动特性，在图6-32上固定时间尺度a值（分别取$a=2$、7、12、25），作平行于b轴的切割线，在切割线上取点，作小波变换系数$W_f(a, b)$的实部（表示为$R[W_f(a, b)]$）随时移b变化的过程线，如图6-33所示。

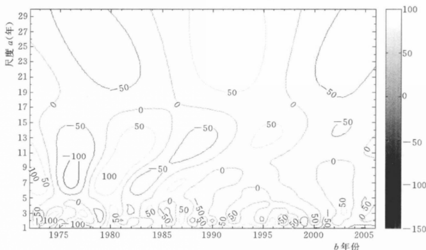


图6-32　前进农场秋季降水距平序列小波变换系数实部时频分布

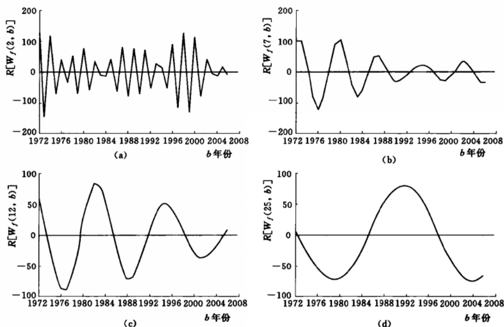


图6-33　不同尺度下前进农场秋季降水距平序列 Morlet 小波变换系数实部变化过程

图 6-33（a）给出了 2 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，降水量旱涝变化及正负位相转变点位置可以准确给出（限于篇幅，这里不具体给出）。图 6-33（b）给出了 7 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1974 年以前、1979～1981 年、1986～1989 年、1993～1996 年、2001～2004 年为正位相，表示降水量偏多；而 1975～1978 年、1982～1985 年、1990～1992 年、1997～2000 年及 2005 年以后为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1974 年、1978 年、1981 年、1985 年、1989 年、1992 年、1997 年、2000 年、和 2004 年。图 6-33（c）给出了 12 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1974 年以前、1980～1985 年、1992～1998 年及 2006 年为正位相，表示降水量偏多；而 1975～1979 年、1986～1991 年、1999～2005 年为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1974 年、1980 年、1986 年、1992 年、1998 年和 2005 年。图 6-33（d）给出了 25 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1973 年以前、1986～1998 年为正位相，表示降水量偏多；而 1974～1985 年及 1999 年以后为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1973 年、1985 年和 1998 年。

3. 秋季降水序列主要周期分析

利用已经求解出来的不同尺度下的小波变换系数，按照前述方法，通过计算机编程，绘制前进农场秋季降水距平序列小波方差图，如图 6-34 所示。从图 6-34 可以看出，小波方差的主要峰值分别出现在尺度 $a=2$，7，12，25 处，第一峰值为尺度 $a=25$ 所对应的小波方差，说明 25 年左右的周期振荡最强，为第一主周期，第二、第三、第四主周期分别为 2 年、7 年和 12 年。为了识别上述主周期是否具有统计意义，还需要进行显著性检验。

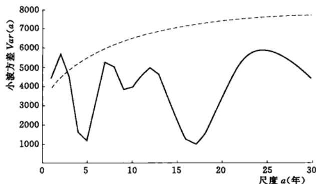


图 6-34　前进农场秋季降水距平序列小波方差
（实线为小波方差，虚线为 95%置信水平）

经过计算，前进农场秋季降水序列的一阶自相关系数 $r(1)=-0.0626<r_c=0.2485$，所以采用白噪声谱对小波方差进行检验，如图 6-34 所示。由图 6-34 可以看出，只有 2 年左右的周期超过了 95%置信水平，因此，前进农场秋季降水序列真正的主周期为 2 年左右。7 年、12 年和 25 年左右的周期虽然没有通过显著性检验，但其小波方差峰值也比较突出。

4. 秋季降水序列变化趋势分析

图 6－33 已经给出不同尺度下小波变换系数实部变化过程，通过图 6－33 即可分析出各主要时间尺度下前进农场秋季降水序列的变化趋势。分析较小尺度 2 年、7 年及较大尺度 12 年的变化趋势可以看出，2007 年左右，前进农场秋季降水量将处于偏少期，而 2008 年以后将进入降水偏多期；分析较大尺度 25 年的变化趋势可以看出，2007～2010 年，前进农场秋季降水量将处于偏少期，而 2011 年以后的 13 年内，前进农场秋季降水量将处于偏多期。

（四）冬季降水距平序列多时间尺度分析

1. 冬季降水距平序列小波变换

根据式（3－27），编程计算前进农场冬季降水距平序列 $f_4(k\Delta t)$（$k=1$，2，…，35；$\Delta t=1$）的小波变换系数 $W_f(a, b)$。

2. 冬季降水距平序列时频分析

按照前述方法绘制前进农场冬季降水距平序列小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的模平方等值线图（见图 6－35）和实部等值线图（见图 6－36），在此基础上进行冬季降水距平序列的时频变化分析。

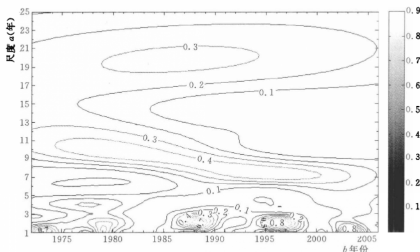


图 6－35　前进农场冬季降水距平序列小波变换系数模平方（$\times10^3$）等值线

（1）小波变换系数模平方时频特性分析。由图 6－35 可以看出不同时间尺度信号能量分布的强弱，其中 1～4 年时间尺度信号能量变化最强，主要发生在 1984～1999 年，振荡中心在 1989 年和 1996 年；6～13 年时间尺度信号能量变化也较强，主要发生在 1972～2005 年，振荡中心在 1989 年；9～25 年时间尺度信号主要发生在 1972～2006 年；1～2 年时间尺度信号主要发生在 1972～1980 年、2002～2005 年；其余时间尺度信号能量变化则较弱。

（2）小波变换系数实部时频特性分析。由图 6－36 可以看出不同时间尺度的变化、正负位相转变点的分布及其位相结构，其中，1～4 年、6～13 年时间尺度表现最为明显，正

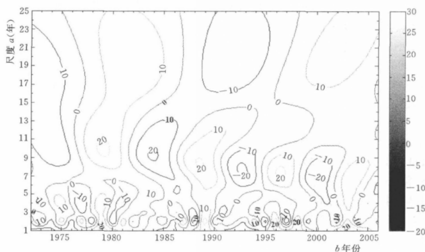


图 6-36 前进农场冬季降水距平序列小波变换系数实部时频分布

负位相交替出现，其中心时间尺度为 2 年和 8 年左右。另外，9～25 年时间尺度也有表现，其中心时间尺度为 20 年左右。为了进一步说明前进农场冬季降水距平序列旱、涝交替变化的波动特性，在图 6-36 上固定时间尺度 a 值（分别取 $a=2$，8，20），作平行于 b 轴的切割线，在切割线上取点，作小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的实部（表示为 $R[W_f(a, b)]$）随时移 b 变化的过程线，如图 6-37 所示。

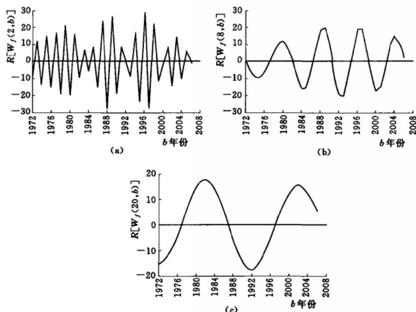


图 6-37 不同尺度下前进农场冬季降水距平序列 Morlet 小波变换系数实部变化过程

图 6-37（a）给出了 2 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，降水量旱涝变化及正负位相转变点位置可以准确给出（限于篇幅，这里不具体给出）。图 6-37（b）给出了 8 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1972 年、1978～1982 年、1987～1991 年、1995～1998 年及 2003 年以后为正位相，表示降水量偏多；而 1973～1977 年、1983～1986 年、1992～1994 年、1999～2002 年为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1973 年、1977 年、1982 年、1986 年、1991 年、1994 年、1998 年和 2002 年。图 6-37（c）给出了 20 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1978～1987 年及 1998 年以后为正位相，表示降水量偏多；而 1977 年以前、1988～1997 年为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1977 年、1987 年和 1997 年。

3. 冬季降水序列主要周期分析

利用已经求解出来的不同尺度下的小波变换系数，按照前述方法，通过计算机编程，绘制前进农场冬季降水距平序列小波方差图，如图 6-38 所示。从图 6-38 可以看出，小波方差的主要峰值分别出现在尺度 $a=2$，8，20 处，第一峰值为尺度 $a=20$ 所对应的小波方差，说明 20 年左右的周期振荡最强，为第一主周期，第二、第三主周期分别为 8 年和 2 年。为了识别上述主周期是否具有统计意义，还需要进行显著性检验。

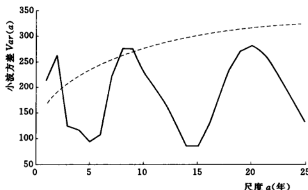


图 6-38　前进农场冬季降水距平序列小波方差
（实线为小波方差，虚线为 95%置信水平）

经过计算，前进农场冬季降水序列的一阶自相关系数 $r(1)=-0.0185<r_c=0.2485$，所以采用白噪声谱对小波方差进行检验，如图 6-38 所示。由图 6-38 可以看出，只有 2 年和 8 年左右的周期超过了 95%置信水平，因此，前进农场冬季降水序列真正的主周期为 2 年和 8 年左右。20 年左右的周期虽然没有通过显著性检验，但其小波方差峰值也比较突出。

4. 冬季降水序列变化趋势分析

图 6-37 已经给出不同尺度下小波变换系数实部变化过程，通过图 6-37 即可分析出各主要时间尺度下前进农场冬季降水序列的变化趋势。分析较小尺度 2 年和 8 年的变化趋势可以看出，2007 年左右，前进农场冬季降水量将处于偏少期，而 2011 年以后将进入降水偏多期；分析较大尺度 20 年的变化趋势可以看出，2007 年左右，前进农场冬季降水量

将处于偏多期，而 2008 年以后的 10 年内，前进农场冬季降水量将处于偏少期。

（五）年降水距平序列多时间尺度分析

1. 年降水距平序列小波变换

根据式（3－27），编程计算前进农场年降水距平序列 $f(k\Delta t)$（$k=1, 2, \cdots, 35$；$\Delta t=1$）的小波变换系数 $W_f(a, b)$。

2. 年降水距平序列时频分析

按照前述方法绘制前进农场年降水距平序列小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的模平方等值线图（见图 6－39）和实部等值线图（见图 6－40），在此基础上进行年降水距平序列的时频变化分析。

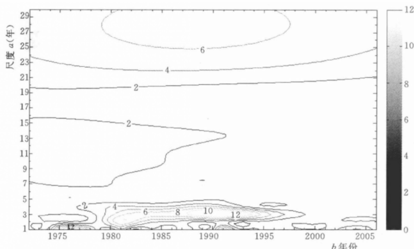


图 6－39　前进农场年降水距平序列小波变换系数模平方（$\times 10^4$）等值线

（1）小波变换系数模平方时频特性分析。由图 6－39 可以看出不同时间尺度信号能量分布的强弱，其中 1～4 年时间尺度信号能量变化最强，主要发生在 1979～1997 年，振荡中心在 1991 年；19～30 年时间尺度信号能量变化也较强，主要发生在 1972～2006 年，振荡中心在 1991 年；7～16 年时间尺度信号主要发生在 1972～1991 年；1～2 年时间尺度信号主要发生在 1974～1986 年、1988～1992 年及 2002～2005 年；其余时间尺度信号能量变化则较弱。

（2）小波变换系数实部时频特性分析。由图 6－40 可以看出不同时间尺度的变化、正负位相转变点的分布及其位相结构，其中，1～4 年、19～30 年时间尺度表现最为明显，正负位相交替出现，其中心时间尺度为 3 年和 28 年左右。另外，7～16 年时间尺度也有表现，其中心时间尺度为 13 年左右。为了进一步说明前进农场年降水距平序列旱、涝交替变化的波动特性，在图 6－40 上固定时间尺度 a 值（分别取 $a=3, 13, 28$），作平行于 b 轴的切割线，在切割线上取点，作小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的实部（表示为 $R[W_f(a, b)]$）随时移 b 变化的过程线，如图 6－41 所示。

图 6－41（a）给出了 3 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，降水量旱涝变化及正

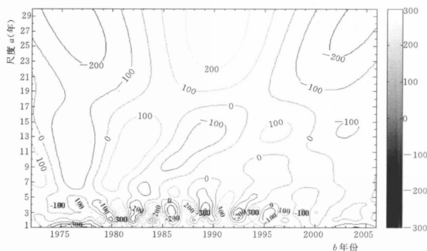


图 6-40　前进农场年降水距平序列小波变换系数实部时频分布

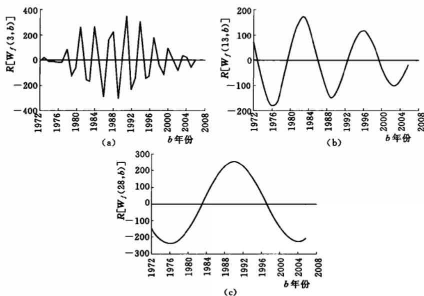


图 6-41　不同尺度下前进农场年降水距平序列 Morlet 小波变换系数实部变化过程

负位相转变点位置可以准确给出（限于篇幅，这里不具体给出）。图 6-41（b）给出了 13 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1973 年以前、1980～1986 年、1993～1999 年为正位相，表示降水量偏多；而 1974～1979 年、1987～1992 年及 2000 年以后为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1973 年、1979 年、1986 年、1992 年和 1999 年。图 6-41（c）给出了 28 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1984～1997 年为正位相，表示降水量偏多；而 1983 年以前及 1998 年以后为负位相，表

示降水量偏少；正负位相转变点在1983年和1997年。

3. 年降水序列主要周期分析

利用已经求解出来的不同尺度下的小波变换系数，按照前述方法，通过计算机编程，绘制前进农场年降水距平序列小波方差图，如图6-42所示。从图6-42可以看出，小波方差的主要峰值分别出现在尺度$a=3$，13，28处，第一峰值为尺度$a=28$所对应的小波方差，说明28年左右的周期振荡最强，为第一主周期，第二、第三主周期分别为3年和13年。为了识别上述主周期是否具有统计意义，还需要进行显著性检验。

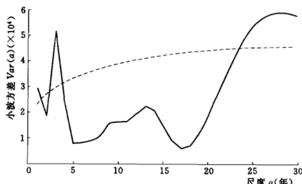


图6-42　前进农场年降水距平序列小波方差
（实线为小波方差，虚线为95%置信水平）

经过计算，前进农场年降水序列的一阶自相关系数$r(1)=-0.0272<r_c=0.2485$，所以采用白噪声谱对小波方差进行检验，如图6-42所示。由图6-42可以看出，只有3年和28年左右的周期超过了95%置信水平，因此，前进农场年降水序列真正的主周期为3年和28年左右。13年左右的小波方差虽然也具有一定峰值，但已不明显。

4. 年降水序列变化趋势分析

图6-41已经给出不同尺度下小波变换系数实部变化过程，通过图6-41即可分析出各主要时间尺度下前进农场年降水序列的变化趋势。分析较小尺度3年和13年的变化趋势可以看出，2007年左右，前进农场年降水量将处于偏多期，而2013年以后将进入降水偏少期；分析较大尺度28年的变化趋势可以看出，2007～2011年，前进农场年降水量将处于偏少期，而2012年以后的14年内，前进农场年降水量将处于偏多期。

三、中区复杂降水序列多时间尺度变化特征统计分析

结合前述分析结果，对前进农场各季节及年降水序列多时间尺度变化特征进行统计，见表6-2。

表6-2　前进农场不同降水序列多时间尺度变化特征

降水序列	主　周　期	显著主周期	小尺度变化趋势	大尺度变化趋势
春季	17年、4年	4年和17年左右	2007～2008年，偏少期；2009年以后，偏多期	2007～2013年，偏少期；2014年以后的9年内，偏多期

续表

降水序列	主　周　期	显著主周期	小尺度变化趋势	大尺度变化趋势
夏季	3年、27年	3年和27年左右	2007年左右，偏多期；2008年以后，偏少期	2007～2010年，偏少期；2011年以后的14年内，偏多期
秋季	25年、2年、7年和12年	2年左右	2007年左右，偏少期；2008年以后，偏多期	2007～2010年，偏少期；2011年以后的13年内，偏多期
冬季	20年、8年和2年	2年和8年左右	2007年左右，偏少期；2011年以后，偏多期	2007年，偏多期；2008年以后的10年内，偏少期
全年	28年、3年和13年	3年和28年左右	2007年左右，偏多期；2013年以后，偏少期	2007～2011年，偏少期；2012年以后的14年内，偏多期

由表6-2可以看出，前进农场夏季降水序列与年降水序列具有相似的主周期，且小尺度、大尺度变化趋势大致相同，因此，该地区夏季降水控制着全年降水。

第四节　建三江分局南区复杂季节降水序列多时间尺度分析

由表4-31可以看出，建三江分局南区6个农场季节降水序列复杂性排序分别为⑧、⑥、④、⑨、⑬、②，其中，八五九农场排序为②，在南区6个农场中复杂性排序最高。现以八五九农场作为建三江分局南区的代表，对其季节及年降水实测序列资料进行多时间尺度分析，以了解其不同时间尺度下的详细结构和变化趋势。

一、资料处理

为处理方便，对八五九农场1965～2006年春、夏、秋、冬四季及年降水（当年3月至次年2月）实测序列资料（$n=42$）进行距平（中心化）处理，并绘制四季及年降水距平序列变化曲线，如图6-43所示。

二、南区复杂季节及年降水距平序列多时间尺度分析

（一）春季降水距平序列多时间尺度分析

1. *春季降水距平序列小波变换*

根据式（3-27），编程计算八五九农场春季降水距平序列 $f_1(k\Delta t)$（$k=1，2，\cdots，42$；$\Delta t=1$）的小波变换系数 $W_f(a，b)$。

2. *春季降水距平序列时频分析*

按照前述方法绘制八五九农场春季降水距平序列小波变换系数 $W_f(a，b)$ 的模平方等值线图（见图6-44）和实部等值线图（见图6-45），在此基础上进行春季降水距平序列的时频变化分析。

（1）小波变换系数模平方时频特性分析。由图6-44可以看出不同时间尺度信号能量分布的强弱，其中1～5年时间尺度信号能量变化最强，主要发生在1968～1983年、1986～1997年及2000～2006年，振荡中心在1971年、1990年及2004年；17～25年时间尺度

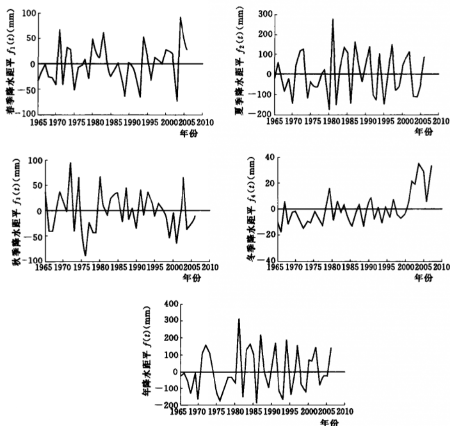


图 6-43　八五九农场四季及年降水距平序列变化曲线（1965～2006 年）

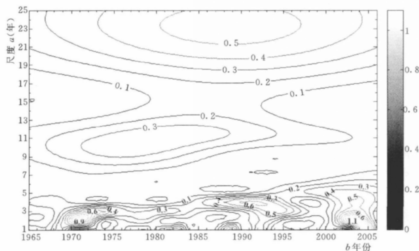


图 6-44　八五九农场春季降水距平序列小波变换系数模平方（×10⁴）等值线

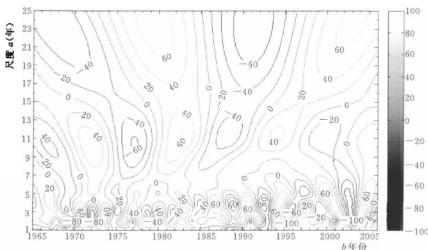


图 6-45　八五九农场春季降水距平序列小波变换系数实部时频分布

信号能量变化也较强，主要发生在 1965～2006 年，振荡中心在 1990 年；8～13 年时间尺度信号主要发生在 1967～1994 年，振荡中心在 1980 年；1～2 年时间尺度信号主要发生在 1976～1984 年、1987～1990 年及 1994～2000 年；其余时间尺度信号能量变化则较弱。

（2）小波变换系数实部时频特性分析。由图 6-45 可以看出不同时间尺度的变化、正负位相转变点的分布及其位相结构，其中，1～5 年、17～25 年时间尺度表现最为明显，正负位相交替出现，其中心时间尺度为 3 年和 24 年左右。另外，8～13 年时间尺度也有表现，其中心时间尺度为 11 年左右。为了进一步说明八五九农场春季降水距平序列旱、涝交替变化的波动特性，在图 6-45 上固定时间尺度 a 值（分别取 $a=3$，11，24），作平行于 b 轴的切割线，在切割线上取点，作小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的实部（表示为 $R[W_f(a, b)]$）随时移 b 变化的过程线，如图 6-46 所示。

图 6-46（a）给出了 3 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，降水量旱涝变化及正负位相转变点位置可以准确给出（限于篇幅，这里不具体给出）。图 6-46（b）给出了 11 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1970～1974 年、1981～1985 年、1992～1997 年及 2003 年以后为正位相，表示降水量偏多；而 1969 年以前、1975～1980 年、1986～1991 年、1998～2002 年为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1969 年、1974 年、1980 年、1985 年、1991 年、1997 年和 2002 年。图 6-46（c）给出了 24 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1974～1985 年及 1998 年以后为正位相，表示降水量偏多；而 1973 年以前、1986～1997 年以后为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1973 年、1985 年和 1997 年。

3. 春季降水序列主要周期分析

利用已经求解出来的不同尺度下的小波变换系数，按照前述方法，通过计算机编程，绘制八五九农场春季降水距平序列小波方差图，如图 6-47 所示。从图 6-47 可以看出，小波方差的主要峰值分别出现在尺度 $a=3$，11，24 处，第一峰值为尺度 $a=24$ 所对应的

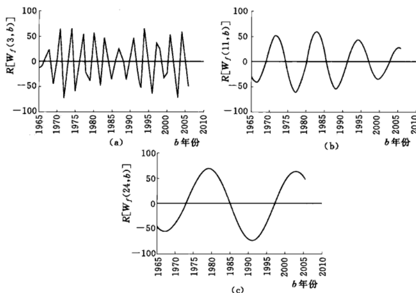


图 6-46　不同尺度下八五九农场春季降水距平序列 Morlet 小波变换系数实部变化过程

小波方差，说明 24 年左右的周期振荡最强，为第一主周期，第二、第三主周期分别为 3 年和 11 年。为了识别上述主周期是否具有统计意义，还需要进行显著性检验。

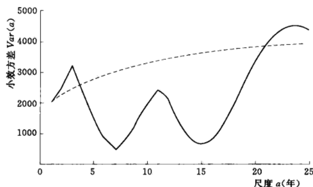


图 6-47　八五九农场春季降水距平序列小波方差
（实线为小波方差，虚线为 95%置信水平）

经过计算，八五九农场春季降水序列的一阶自相关系数 $r(1)=-0.1132$，再根据式（6-3）计算 r_c，$r_c=\frac{-1+1.645\times\sqrt{42-2}}{42-1}=0.2294>r(1)$，所以采用白噪声谱对小波方差进行检验，如图 6-47 所示。由图 6-47 可以看出，只有 3 年和 24 年左右的周期超过了 95%置信水平，因此，八五九农场春季降水序列真正的主周期为 3 年和 24 年左右。11 年左右的小波方差虽然也具有一定峰值，但已不明显。

4. 春季降水序列变化趋势分析

图 6-46 已经给出不同尺度下小波变换系数实部变化过程，通过图 6-46 即可分析出各主要时间尺度下八五九农场春季降水序列的变化趋势。分析较小尺度 3 年和 11 年的变化趋势可以看出，2007～2008 年，八五九农场春季降水量将处于偏多期，而 2009 年以后将进入降水偏少期；分析较大尺度 24 年的变化趋势可以看出，2007～2009 年，八五九农场春季降水量将处于偏多期，而 2010 年以后的 12 年内，八五九农场春季降水量将处于偏少期。

（二）夏季降水距平序列多时间尺度分析

1. 夏季降水距平序列小波变换

根据式（3-27），编程计算八五九农场夏季降水距平序列 $f_2(k\Delta t)$（$k=1, 2, \cdots, 42$；$\Delta t=1$）的小波变换系数 $W_f(a, b)$。

2. 夏季降水距平序列时频分析

按照前述方法绘制八五九农场夏季降水距平序列小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的模平方等值线图（见图 6-48）和实部等值线图（见图 6-49），在此基础上进行夏季降水距平序列的时频变化分析。

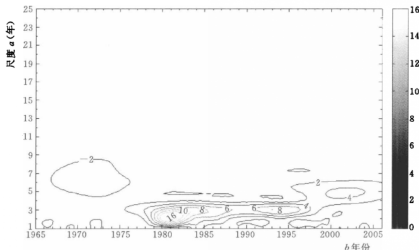


图 6-48　八五九农场夏季降水距平序列小波变换系数模平方（$\times 10^4$）等值线

（1）小波变换系数模平方时频特性分析。由图 6-48 可以看出不同时间尺度信号能量分布的强弱，其中 1～4 年时间尺度信号能量变化最强，主要发生在 1978～1998 年，振荡中心在 1981 年和 1994 年；4～9 年时间尺度信号主要发生在 1967～1976 年、1995～2006 年；1～2 年时间尺度信号主要发生在 1969～1970 年、1972～1974 年及 2003～2004 年；其余时间尺度信号能量变化则较弱。

（2）小波变换系数实部时频特性分析。由图 6-49 可以看出不同时间尺度的变化、正负位相转变点的分布及其位相结构，其中，1～4 年时间尺度表现最为明显，正负位相交替出现，其中心时间尺度为 3 年左右。另外，4～10 年、13～16 年时间尺度也有表现，其

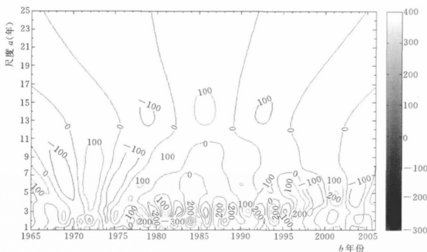


图 6-49 八五九农场夏季降水距平序列小波变换系数实部时频分布

中心时间尺度为 6 年、9 年和 14 年左右。为了进一步说明八五九农场夏季降水距平序列旱、涝交替变化的波动特性，在图 6-49 上固定时间尺度 a 值（分别取 $a=3$，6，9，14），作平行于 b 轴的切割线，在切割线上取点，作小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的实部（表示为$R[W_f(a, b)]$）随时移 b 变化的过程线，如图 6-50 所示。

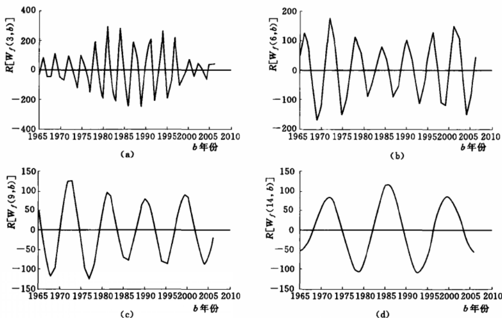


图 6-50 不同尺度下八五九农场夏季降水距平序列 Morlet 小波变换系数实部变化过程



图6-50（a）给出了3年时间尺度小波变换系数实部变化过程，降水量旱涝变化及正负位相转变点位置可以准确给出（限于篇幅，这里不具体给出）。图6-50（b）给出了6年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1968年以前、1972～1974年、1978～1980年、1984～1986年、1990～1992年、1996～1997年、2001～2003年及2006年为正位相，表示降水量偏多；而1969～1971年、1975～1977年、1981～1983年、1987～1989年、1993～1995年、1998～2000年、2004～2005年为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在1968年、1971年、1974年、1977年、1980年、1983年、1986年、1989年、1992年、1995年、1997年、2000年、2003年和2005年。图6-50（c）给出了9年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1966年以前、1971～1975年、1980～1984年、1989～1992年、1998～2002年为正位相，表示降水量偏多；而1967～1970年、1976～1979年、1985～1988年、1993～1997年及2003年以后为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在1966年、1970年、1975年、1979年、1984年、1988年、1993年、1997年和2002年。图6-50（d）给出了14年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1969～1975年、1983～1989年、1997～2003年为正位相，表示降水量偏多；而1968年以前、1976～1982年、1990～1996年及2004年以后为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在1968年、1975年、1982年、1989年、1996年和2003年。

3. 夏季降水序列主要周期分析

利用已经求解出来的不同尺度下的小波变换系数，按照前述方法，通过计算机编程，绘制八五九农场夏季降水距平序列小波方差图，如图6-51所示。从图6-51可以看出，小波方差的主要峰值分别出现在尺度$a=3$，6，9，14处，第一峰值为尺度$a=3$所对应的小波方差，说明3年左右的周期振荡最强，为第一主周期，第二、第三、第四主周期分别为6年、9年和14年。为了识别上述主周期是否具有统计意义，还需要进行显著性检验。

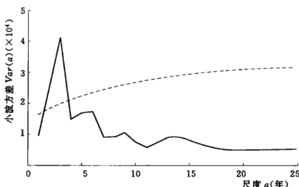


图6-51　八五九农场夏季降水距平序列小波方差
（实线为小波方差，虚线为95%置信水平）

经过计算，八五九农场夏季降水序列的一阶自相关系数$r(1)=-0.2673<r_c=0.2294$，所以采用白噪声谱对小波方差进行检验，如图6-51所示。由图6-51可以看出，只有3年左右的周期超过了95%置信水平，因此，八五九农场夏季降水序列真正的

主周期为3年左右。6年、9年和14年左右的小波方差虽然也具有一定峰值，但已不明显。

4. 夏降水序列变化趋势分析

图6-50已经给出不同尺度下小波变换系数实部变化过程，通过图6-50即可分析出各主要时间尺度下八五九农场夏季降水序列的变化趋势。分析较小尺度3年、6年和9年的变化趋势可以看出，2007～2008年，八五九农场春季降水量将处于偏多期，而2012年以后将进入降水偏少期；分析较大尺度14年的变化趋势可以看出，2007～2010年，八五九农场夏季降水量将处于偏少期，而2011年以后的7年内，八五九农场夏季降水量将处于偏多期。

（三）秋季降水距平序列多时间尺度分析

1. 秋季降水距平序列小波变换

根据式（3-27），编程计算八五九农场秋季降水距平序列 $f_3(k\Delta t)$ （$k=1$，2，…，42；$\Delta t=1$）的小波变换系数 $W_f(a, b)$。

2. 秋季降水距平序列时频分析

按照前述方法绘制八五九农场秋季降水距平序列小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的模平方等值线图（见图6-52）和实部等值线图（见图6-53），在此基础上进行秋季降水距平序列的时频变化分析。

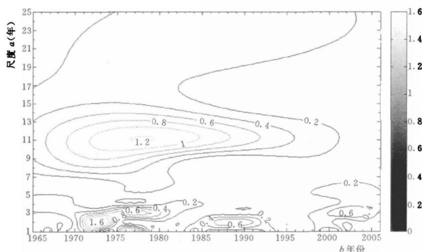


图6-52　八五九农场秋季降水距平序列小波变换系数模平方（×10⁴）等值线

（1）小波变换系数模平方时频特性分析。由图6-52可以看出不同时间尺度信号能量分布的强弱，其中1～4年时间尺度信号能量变化最强，主要发生在1970～1981年、2000～2005年，振荡中心在1972年和2003年；7～17年时间尺度信号主要发生在1965～2001年，振荡中心在1977年；1～3年时间尺度信号主要发生在1965～1970年、1975～1979年、1983～1994年及1999～2001年；其余时间尺度信号能量变化则较弱。

（2）小波变换系数实部时频特性分析。由图6-53可以看出不同时间尺度的变化、正

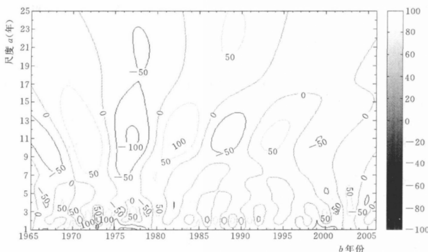


图 6－53　八五九农场秋季降水距平序列小波变换系数实部时频分布

负位相转变点的分布及其位相结构，其中，1～4 年、7～17 年时间尺度表现最为明显，正负位相交替出现，其中心时间尺度为 3 年和 11 年左右。另外，18～25 年时间尺度也有表现，其中心时间尺度为 22 年左右。为了进一步说明八五九农场秋季降水距平序列旱、涝交替变化的波动特性，在图 6－53 上固定时间尺度 a 值（分别取 $a=3，11，22$），作平行于 b 轴的切割线，在切割线上取点，作小波变换系数 $W_f(a，b)$ 的实部（表示为 $R[W_f(a，b)]$）随时移 b 变化的过程线，如图 6－54 所示。

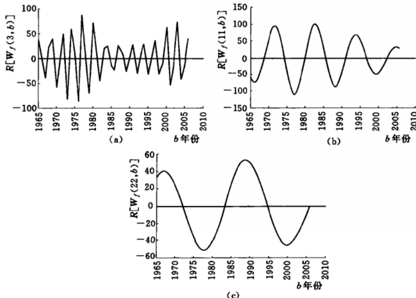


图 6－54　不同尺度下八五九农场秋季降水距平序列 Morlet 小波变换系数实部变化过程

图 6-54（a）给出了3年时间尺度小波变换系数实部变化过程，降水量旱涝变化及正负位相转变点位置可以准确给出（限于篇幅，这里不具体给出）。图 6-54（b）给出了 11 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1970～1974 年、1981～1985 年、1992～1997 年及 2003 年以后为正位相，表示降水量偏多；而 1969 年以前、1975～1980 年、1986～1991 年、1998～2002 年为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1969 年、1974 年、1980 年、1985 年、1991 年、1997 年和 2002 年。图 6-54（c）给出了 22 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1972 年以前、1984～1995 年为正位相，表示降水量偏多；而 1973～1983 年、1996～2006 年为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1972 年、1983 年、1995 年和 2006 年。

3. 秋季降水序列主要周期分析

利用已经求解出来的不同尺度下的小波变换系数，按照前述方法，通过计算机编程，绘制八五九农场秋季降水距平序列小波方差图，如图 6-55 所示。从图 6-55 可以看出，小波方差的主要峰值分别出现在尺度 $a=3$，11，22 处，第一峰值为尺度 $a=11$ 所对应的小波方差，说明 11 年左右的周期振荡最强，为第一主周期，第二、第三主周期分别为 3 年和 22 年。为了识别上述主周期是否具有统计意义，还需要进行显著性检验。

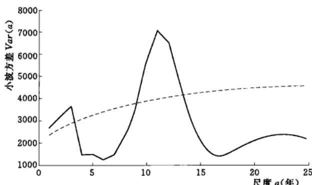


图 6-55　八五九农场秋季降水距平序列小波方差
（实线为小波方差，虚线为 95%置信水平）

经过计算，八五九农场秋季降水序列的一阶自相关系数 $r(1)=-0.0837<r_c=0.2294$，所以采用白噪声谱对小波方差进行检验，见图 6-55。由图 6-55 可以看出，只有 3 年和 11 年左右的周期超过了 95%置信水平，因此，八五九农场秋季降水序列真正的主周期为 3 年和 11 年左右。22 年左右的小波方差虽然也具有一定峰值，但已不明显。

4. 秋季降水序列变化趋势分析

图 6-54 已经给出不同尺度下小波变换系数实部变化过程，通过图 6-54 即可分析出各主要时间尺度下八五九农场秋季降水序列的变化趋势。分析较小尺度 3 年和 11 年的变化趋势可以看出，2007～2008 年，八五九农场秋季降水量将处于偏多期，而 2009 年以后将进入降水偏少期；分析较大尺度 22 年的变化趋势可以看出，2007～2017 年，八五九农场秋季降水量将处于偏多期，而 2018 年以后的 11 年内，八五九农场秋季降水量将处于偏

少期。

（四）冬季降水距平序列多时间尺度分析

1. 冬季降水距平序列小波变换

根据式（3-27），编程计算八五九农场冬季降水距平序列 $f_4(k\Delta t)$（$k=1, 2, \cdots, 42$；$\Delta t=1$）的小波变换系数 $W_f(a, b)$。

2. 冬季降水距平序列时频分析

按照前述方法绘制八五九农场冬季降水距平序列小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的模平方等值线图（见图 6-56）和实部等值线图（见图 6-57），在此基础上进行冬季降水距平序列的时频变化分析。

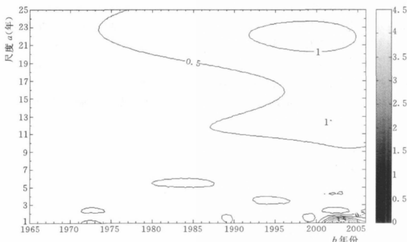


图 6-56 八五九农场冬季降水距平序列小波变换系数模平方（×10³）等值线

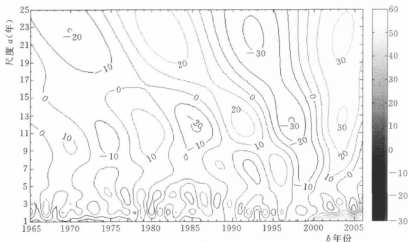


图 6-57 八五九农场冬季降水距平序列小波变换系数实部时频分布

（1）小波变换系数模平方时频特性分析。由图 6－56 可以看出不同时间尺度信号能量分布的强弱，其中 1～2 年时间尺度信号能量变化最强，主要发生在 1971～1974 年、2000～2006 年，振荡中心在 2003 年；9～25 年时间尺度信号主要发生在 1973～2006 年，振荡中心在 2003 年；其余时间尺度信号能量变化则较弱。

（2）小波变换系数实部时频特性分析。由图 6－57 可以看出不同时间尺度的变化、正负位相转变点的分布及其位相结构，其中，9～14 年、18～25 年时间尺度表现最为明显，正负位相交替出现，其中心时间尺度为 12 年和 22 年左右。为了进一步说明八五九农场冬季降水距平序列旱、涝交替变化的波动特性，在图 6－57 上固定时间尺度 a 值（分别取 $a=12$，22），作平行于 b 轴的切割线，在切割线上取点，作小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的实部（表示为 $R[W_f(a, b)]$）随时移 b 变化的过程线，如图 6－58 所示。

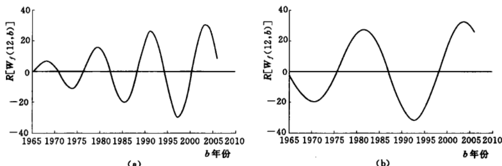


图 6－58　不同尺度下八五九农场冬季降水距平序列 Morlet 小波变换系数实部变化过程

图 6－58（a）给出了 12 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1965～1971 年、1977～1982 年、1989～1994 年及 2001 年以后为正位相，表示降水量偏多；而 1972～1976 年、1983～1988 年、1995～2000 年为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1965 年、1971 年、1977 年、1982 年、1988 年、1994 年和 2000 年。图 6－58（b）给出了 22 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1977～1987 年及 1999 年以后为正位相，表示降水量偏多；而 1976 年以前、1988～1998 年为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1976 年、1987 年和 1998 年。

3. 冬季降水序列主要周期分析

利用已经求解出来的不同尺度下的小波变换系数，按照前述方法，通过计算机编程，绘制八五九农场冬季降水距平序列小波方差图，如图 6－59 所示。从图 6－59 可以看出，小波方差的主要峰值分别出现在尺度 $a=12$，22 处，第一峰值为尺度 $a=22$ 所对应的小波方差，说明 22 年左右的周期振荡最强，为第一主周期，第二主周期为 12 年。为了识别上述主周期是否具有统计意义，还需要进行显著性检验。

经过计算，八五九农场冬季降水序列的一阶自相关系数 $r(1)=0.4139>r_c=0.2294$，所以采用红噪声谱对小波方差进行检验，如图 6－59 所示。由图 6－59 可以看出，12 年和 22 年左右的周期均低于 95％置信水平，没有通过显著性检验，这说明，八五九农场冬季降水序列随机特征明显，没有显著性周期性变化。

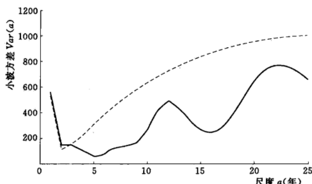


图 6-59　八五九农场冬季降水距平序列小波方差
（实线为小波方差，虚线为 95%置信水平）

4. 冬季降水序列变化趋势分析

图 6-58 已经给出不同尺度下小波变换系数实部变化过程，通过图 6-58 即可分析出各主要时间尺度下八五九农场冬季降水序列的变化趋势。分析较小尺度 12 年的变化趋势可以看出，2007～2012 年，八五九农场冬季降水量将处于偏少期，而 2013 年以后将进入降水偏多期；分析较大尺度 22 年的变化趋势可以看出，2007～2009 年，八五九农场冬季降水量将处于偏多期，而 2010 年以后的 11 年内，八五九农场秋季降水量将处于偏少期。

（五）年降水距平序列多时间尺度分析

1. 年降水距平序列小波变换

根据式（3-27），编程计算八五九农场年降水距平序列 $f(k\Delta t)$（$k=1, 2, \cdots, 42$; $\Delta t=1$）的小波变换系数 $W_f(a, b)$。

2. 年降水距平序列时频分析

按照前述方法绘制八五九农场年降水距平序列小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的模平方等值线图（见图 6-60）和实部等值线图（见图 6-61），在此基础上进行年降水距平序列的时频变化分析。

（1）小波变换系数模平方时频特性分析。由图 6-60 可以看出不同时间尺度信号能量分布的强弱，其中 1～4 年时间尺度信号能量变化最强，主要发生在 1978～1999 年，振荡中心在 1981 年和 1994 年；5～20 年时间尺度信号主要发生在 1965～1995 年，振荡中心在 1972 年；1～2 年时间尺度信号主要发生在 1967～1973 年、1974～1978 年及 2001～2006 年；其余时间尺度信号能量变化则较弱。

（2）小波变换系数实部时频特性分析。由图 6-61 可以看出不同时间尺度的变化、正负位相转变点的分布及其位相结构，其中，1～4 年、5～16 年时间尺度表现最为明显，正负位相交替出现，其中心时间尺度为 3 年和 10 年左右。另外，4～7 年时间尺度也有表现，其中心时间尺度为 6 年左右。为了进一步说明八五九农场年降水距平序列旱、涝交替变化的波动特性，在图 6-61 上固定时间尺度 a 值（分别取 $a=3, 6, 10$），作平行于 b 轴的切割线，在切割线上取点，作小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的实部（表示为 $R[W_f(a, b)]$）

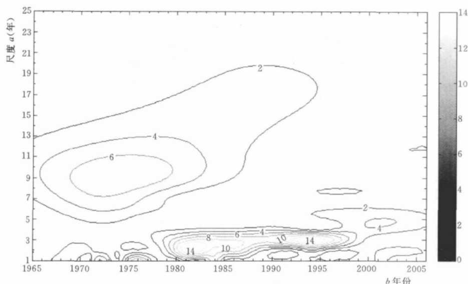


图 6-60　八五九农场年降水距平序列小波变换系数模平方（×10⁴）等值线

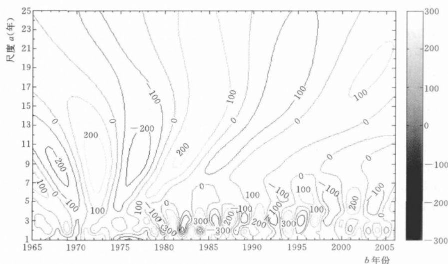


图 6-61　八五九农场年降水距平序列小波变换系数实部时频分布

随时移 b 变化的过程线，如图 6-62 所示。

图 6-62（a）给出了 3 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，降水量旱涝变化及正负位相转变点位置可以准确给出（限于篇幅，这里不具体给出）。图 6-62（b）给出了 6 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1968 年以前、1972～1974 年、1978～1980 年、1984～1986 年、1990～1992 年、1996～1997 年、2001～2003 年及 2006 年为正位相，表示降水量偏多；而 1969～1971 年、1975～1977 年、1981～1983 年、1987～1989 年、1993～1995 年、1998～2000 年、2004～2005 年为负位相，表示降水量偏少；正

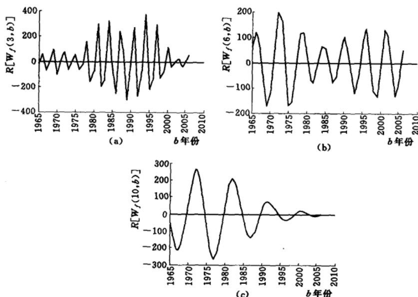


图 6－62　不同尺度下八五九农场年降水距平序列 Morlet 小波变换系数实部变化过程

负位相转变点在 1968 年、1971 年、1974 年、1977 年、1980 年、1983 年、1986 年、1989 年、1992 年、1995 年、1997 年、2000 年、2003 年和 2005 年。图 6－62（c）给出了 10 年时间尺度小波变换系数实部变化过程，可以看出，1971～1975 年、1981～1985 年、1991～1995 年、2000～2003 年为正位相，表示降水量偏多；而 1970 年以前、1976～1980 年、1986～1990 年、1996～1999 年及 2004 年以后为负位相，表示降水量偏少；正负位相转变点在 1970 年、1975 年、1980 年、1985 年、1990 年、1995 年、1999 年和 2003 年。

3. 年降水序列主要周期分析

利用已经求解出来的不同尺度下的小波变换系数，按照前述方法，通过计算机编程，绘制八五九农场年降水距平序列小波方差图，如图 6－63 所示。从图 6－63 可以看出，小波方差的主要峰值分别出现在尺度 $a=3$，6，10 处，第一峰值为尺度 $a=3$ 所对应的小波

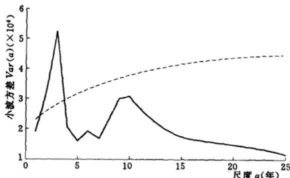


图 6－63　八五九农场年降水距平序列小波方差

（实线为小波方差，虚线为 95%置信水平）

方差，说明3年左右的周期振荡最强，为第一主周期，第二、第三主周期分别为10年和6年。为了识别上述主周期是否具有统计意义，还需要进行显著性检验。

经过计算，八五九农场年降水序列的一阶自相关系数 $r(1)=-0.1603<r_c=0.2294$，所以采用白噪声谱对小波方差进行检验，如图6-63所示。由图6-63可以看出，只有3年左右的周期超过了95%置信水平，因此，八五九农场年降水序列真正的主周期为3年左右。6年和10年左右的小波方差虽然也具有一定峰值，但已不明显。

4. 年降水序列变化趋势分析

图6-62已经给出不同尺度下小波变换系数实部变化过程，通过图6-62即可分析出各主要时间尺度下八五九农场年降水序列的变化趋势。分析较小尺度3年和6年的变化趋势可以看出，2007年左右，八五九农场年降水量将处于偏多期，而2010年以后将进入降水偏少期；分析较大尺度10年的变化趋势可以看出，2007～2009年，八五九农场年降水量将处于偏少期，而2010年以后的4年内，八五九农场年降水量将处于偏多期。

三、南区复杂降水序列多时间尺度变化特征统计分析

结合前述分析结果，对八五九农场各季节及年降水序列多时间尺度变化特征进行统计，见表6-3。

表6-3　　八五九农场不同降水序列多时间尺度变化特征

降水序列	主周期	显著主周期	小尺度变化趋势	大尺度变化趋势
春季	24年、3年和11年	3年和24年左右	2007～2008年，偏多期；2009年以后，偏少期	2007～2009年，偏多期；2010年以后的12年内，偏少期
夏季	3年、6年、9年和14年	3年左右	2007～2008年，偏多期；2012年以后，偏少期	2007～2010年，偏少期；2011年以后的7年内，偏多期
秋季	11年、3年和22年	3年和11年左右	2007～2008年，偏多期；2009年以后，偏少期	2007～2017年，偏多期；2018年以后的11年内，偏少期
冬季	22年、12年	—	2007～2012年，偏少期；2013年以后，偏多期	2007～2009年，偏多期；2010年以后的11年内，偏少期
年	3年、10年和6年	3年左右	2007年左右，偏多期；2010年以后，偏少期	2007～2009年，偏少期；2010年以后的4年内，偏多期

由表6-3可以看出，八五九农场夏季降水序列与年降水序列具有相似的主周期，且小尺度、大尺度变化趋势大致相同，因此，该地区夏季降水控制着全年降水。

参考文献

[1] 李世欣，邵孝侯，赵春青，等．南召县近50年降水变化特征分析［J］．气象与环境科学，2008，31（4）：40-43.

[2] 吴滨，李玲．福建省降水量的趋势变化对旱涝灾害的影响研究［J］．热带气象学报，2009，25（1）：103-109.

[3] 郭雷，马克明，张易．建三江地区不同土地利用类型的反硝化潜力［J］．农业环境科学学报，2009，28（5）：941-945.

[4] 李士峰，崔广臣，杨国顺．三江平原洪涝灾害及治理措施 [J]．水利水电科技进展，2000，20 (1)：65－67.
[5] 王韶华，王丹，刘祥臻．三江平原水旱灾害分析及综合治理 [J]．北京工业大学学报，2003，29 (4)：457－461.
[6] 季友，张琳．挠力河流域湿地和耕地面积变化对径流深的影响分析 [J]．黑龙江水利科技，2009，37 (2)：37－39.
[7] 祁顺杰，陈皓锐．Morlet 小波在降雨的多时间尺度分析中的应用 [J]．南水北调与水利科技，2010，8 (3)：79－82.
[8] 王富强，李红霞．基于小波网络的径流多时间尺度分析及预报方法研究 [J]．水力发电，2010，36 (5)：17－20.
[9] 蔺秋生，黄莉，董耀华．监利水文站年径流量序列多时间尺度分析 [J]．水文，2009，29 (4)：64－67，47.
[10] 刘娜，郑小洋，李为平．基于小波分析的经济数据预测 [J]．重庆工学院学报（自然科学），2009，23 (11)：169－172.
[11] 姜增国，闵志华．基于多尺度小波分析的在线结构损伤诊断方法 [J]．武汉理工大学学报，2010，32 (11)：45－49.
[12] 许月卿，李双成，蔡运龙．基于小波分析的河北平原降水变化规律研究 [J]．中国科学（D 辑：地球科学)，2004，34 (12)：1176－1183.
[13] 陈怀亮，胡鹏，张雪芬，等．农业气候资源多时间尺度分析——以郑州市小麦玉米为例 [J]．自然资源学报，2005，20 (6)：814－821.
[14] 张雪芹，孙杨，毛炜峄，等．中国干旱区气温变化对全球变暖的区域响应 [J]．干旱区研究，2010，27 (4)：592－599.
[15] 王文圣，丁晶，李跃清．水文小波分析 [M]．北京：化学工业出版社，2005.
[16] 姚棣荣，钱恺．小波变换在新安江流域近百年降水变化分析中的应用 [J]．科技通报，2001，17 (3)：17－21.
[17] Jakubowska M. Dedicated wavelet for voltammetric signals analysis [J]．Journal of Electroanalytical Chemistry，2007，603 (1)：113－123.
[18] 蔺秋生，范北林，黄莉．宜昌水文站年径流量演变多时间尺度分析 [J]．长江科学院院报，2009，26 (4)：1－3，12.
[19] Kovács J，Hatvani I G，Korponai J，et al. Morlet wavelet and autocorrelation analysis of long－term data series of the Kis-Balaton water protection system (KBWPS) [J]．Ecological Engineering，2010，36 (10)：1469－1477.
[20] 万的军，穆桂金，雷加强，等．塔里木盆地南缘近 54 年沙尘天气的变化特征及其未来趋势预测 [J]．干旱区资源与环境，2009，23 (9)：78－84.
[21] 康玲，杨正祥，姜铁兵．基于 Morlet 小波的丹江口水库入库流量周期性分析 [J]．计算机工程与科学，2009，31 (11)：149－152.
[22] 高焕芝，彭世彰，孙勇，等．稻田排水在沟塘湿地净化中总氮浓度的周期性特征 [J]．河海大学学报（自然科学版)，2010，38 (2)：220－224.
[23] 林东，袁昌茂，文鸿雁．小波多时间尺度分析在变形分析中的应用 [J]．地理空间信息，2010，8 (2)：143－145.
[24] 梁君，邵骏．基于小波的宝兴河流域降雨序列近似周期分析 [J]．四川水力发电，2010，29 (2)：73－75.
[25] Mi X C，Ren H B，Ouyang Z S，et al. The use of the Mexican Hat and the Morlet wavelets for detection of ecological patterns [J]．Plant Ecology，2005，179 (1)：1－19.



[26] 于浩，张晓萍，李锐．延河流域径流和输沙周期变化特征的小波分析［J］．中国水土保持科学，2008，6（4）：18－22.
[27] 高鹏，穆兴民，王炜．基于Morlet小波的太阳活动与黄河输沙量关系分析［J］．水土保持研究，2010，17（3）：181－183，188.
[28] 宋涛，沙晋明．基于小波变换的福州市降水量变化研究［J］．西南民族大学学报·自然科学版，2010，36（3）：397－401.
[29] 吴小玲，张斌，艾南山，等．基于小波变换的上海市近10年SO_2污染指数的变化［J］．环境科学，2009，30（8）：2193－2198.
[30] 祁顺杰，陈皓锐．Morlet小波在降雨的多时间尺度分析中的应用［J］．南水北调与水利科技，2010，8（3）：79－82.
[31] 张少文，丁晶，廖杰，等．基于小波的黄河上游天然年径流变化特性分析［J］．四川大学学报（工程科学版），2004，36（3）：32－37.
[32] 王兆礼，陈晓宏，黄国如，等．东江流域汛期降雨序列的小波分析［J］．人民长江，2010，41（2）：52－55.
[33] 黄嘉佑，李黄．气象中的谱分析［M］．北京：气象出版社，1984.
[34] Torrence C，Compo G P. A Practical Guide to Wavelet Analysis［J］．Bulletin of the American Meteorological Society，1998，79（1）：61－78.
[35] 韩荣青．副热带大气季节内振荡对东亚夏季旱涝的影响研究［D］．南京：南京信息工程大学，2006.
[36] 郝立生，毕宝贵，姚学祥．太阳活动变化分析［J］．空间科学学报，2007，27（4）：265－270.



第七章 复杂性视角下区域水资源可持续利用对策分析

水资源是支撑区域社会经济发展的珍贵资源，随着人口的增加以及社会经济的飞速发展，已经诱发了水资源匮乏、水体污染、洪涝灾害加剧等全球性水危机。因此，结合区域特点及水资源开发利用现状，探索区域水资源可持续利用实现途径，是区域社会经济可持续发展的重要保障。目前，国内外学者针对区域水资源可持续利用对策，已经从政策、工程、管理等不同层面进行了积极的探索，取得了大量有意义的研究成果。但主要症结在于水文水资源系统自身的复杂性往往被忽略，致使所提对策实用性不足。因此，本章尝试以三江平原建三江分局为例，提出复杂性视角下区域水资源可持续利用对策。

建三江分局是国家重要的商品粮基地，截至 2008 年，建三江分局累计生产粮食 450 亿 kg，上交商品粮 402 亿 kg[1]，商品粮率高达 89.3%，高于黑龙江垦区 84%[2]及黑龙江省 74%[3]的商品粮率，为保障我国粮食安全及促进区域社会经济发展做出了重要贡献。建三江分局水资源比较丰富，每年过境地表水资源量为 2739 亿 m^3，当地产地表水资源量为 10.93 亿 m^3，地下水水资源量为 14.84 亿 m^3[4]，但由于缺少控制性工程，当地地表水利用率仅为 3%左右，过境水利用率更是不足 0.04%，导致长期以来，当地农业灌溉以开发地下水为主（占地下水总用水量的 99%以上[5]），农业灌溉以水田为主，诱发了地下水位下降、抽水成本提高、土壤沙化等问题[6]，而且由于化肥、农药的施用，还引发了一定程度的农业非点源污染问题[7]。同时，建三江分局降水分布不均匀，导致近些年来旱涝灾害频繁发生。根据《建三江分局水利年报》，2007 年，建三江分局旱灾面积为 4 万 hm^2，涝灾面积为 2.6 万 hm^2，导致粮食减产 4.1 万 t，造成直接经济损失 3925 万元；2009 年，建三江分局旱灾面积为 1.97 万 hm^2，洪灾面积为 0.01 万 hm^2，涝灾面积为 13 万 hm^2，导致粮食减产 19.3 万 t，造成直接经济损失 3.864 亿元。由上述分析可知，建三江分局水资源系统复杂性演变特征明显。因此，有必要结合前述复杂地下水埋深与降水序列发展态势分析结果，探讨建三江分局水资源可持续利用对策。

第一节 加强节水教育，提高农民水商品意识

农业是国民经济中的用水大户，提高农民节水意识是发展现代农业、建设节水型社会的重要保障。长期以来，广大农民普遍认为水是“取之不尽、用之不竭”的，水商品意识[8-10]淡薄，加之现行农业灌溉水价的杠杆作用没有得到充分发挥[9,11]，导致农民盲目用水，水资源浪费现象严重。

为了应对日益严峻的水危机，提高公众的节水意识，我国早在 1988 年《中华人民共

和国水法》颁布后，就开展了节水主题教育活动——“中国水周”，时间为每年的7月1～7日；1993年1月18日，第47届联合国大会确定了世界节水主题教育活动——“世界水日”，时间为每年的3月22日；考虑到两个主题活动的内容和目标基本相同，为了突出“世界水日”主题，从1994年开始，“中国水周”的时间改为每年的3月22～28日[12-14]。历年“世界水日”与“中国水周”主题见表7-1[13-15]。

表7-1　“世界水日”与“中国水周”主题

年份	主题	
	世界水日	中国水周
1994	关心水资源人人有责	
1995	妇女和水	
1996	为干渴的城市供水	依法治水、科学管水、强化节水
1997	水的短缺	水与发展
1998	地下水——看不见的资源	依法治水——促进水资源可持续利用
1999	我们（人类）永远生活在缺水状态之中	江河治理是防洪之本
2000	卫生用水	加强节约和保护，实现水资源的可持续利用和保护
2001	21世纪的水	建设节水型社会，实现可持续发展
2002	水与发展	以水资源的可持续利用支持经济社会的可持续发展
2003	水——人类的未来	依法治水，实现水资源可持续利用
2004	水与灾害	人水和谐
2005	生命之水	保障饮水安全，维护生命健康
2006	水与文化	转变用水观念，创新发展模式
2007	应对水短缺	水利发展与和谐社会
2008	涉水卫生	发展水利，改善民生
2009	跨界水——共享的水、共享的机遇	落实科学发展观，节约保护水资源
2010	关注水质、抓住机遇、应对挑战	严格水资源管理，保障可持续发展
2011	城市用水：应对都市化挑战	严格管理水资源，推进水利新跨越

由表7-1可以看出，历年“世界水日”与“中国水周”主题均是围绕水短缺、水污染、水灾害等关键水问题提出的，目的都是为了实现水资源的可持续利用。建三江分局水务管理部门应以每年的“世界水日”及“中国水周”为载体，通过制作宣传板、发放节水知识手册、举行节水讲座等方式，开展节水知识教育，向农民宣传当地水资源开发利用现状，让农民了解当地水资源开发利用中存在的问题及面临的严峻形势，提高农民的水商品意识，促使农民主动参与“功在当代、利在千秋”的节水（特别是农业节水）实践。



第二节　适度发展水田面积，有效涵养地下水资源

一、建三江分局水田面积变化特征分析

建三江分局从 20 世纪 60 年代开始尝试小规模种植水稻。20 世纪 80 年代开始，为了改良低湿地，实现“以稻治涝”[16,17]，建三江分局水稻种植面积开始逐渐增加。从 2009 年《建三江农垦统计年鉴》中收集到建三江分局 1966～2009 年水稻种植面积及农作物播种面积，绘制水稻种植面积与种植比例变化曲线，如图 7－1 所示。

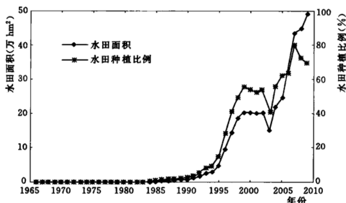


图 7－1　建三江分局水田种植面积与比例变化曲线（1966～2009 年）

由图 7－1 可以看出，建三江分局水田种植面积与种植比例变化趋势基本一致，大致可以划分为五个阶段。第一阶段：1966～1983 年，萌芽发展期。该阶段建三江分局水田种植面积及比例变化不大，水田面积始终没有超过 300hm²，水田种植比例始终没有超过 0.25%，处于较低发展水平；第二阶段：1984～1996 年，平稳增长期。该阶段建三江分局水田种植面积及比例逐年增长（仅 1988 年略有回落），水田面积平均增幅为 7964.94hm²/a，水田种植比例年平均增幅为 2.32%。1996 年，水田面积发展到 96073.33hm²，首次突破 100 万亩，水田种植比例达到 27.95%，首次突破 25%；第三阶段：1997～1999 年，强势增长期。该阶段建三江分局水田种植面积及比例迅速增长，水田面积平均增幅为 29009.17hm²/a，水田种植比例年平均增幅为 7.26%。1997 年，水田面积发展到 146666.67hm²，首次突破 200 万亩，水田种植比例达到 40.85%，首次突破 40%，1999 年水田面积发展到 204685hm²，首次突破 300 万亩，水田种植比例达到 55.36%，首次突破 50%；第四阶段：2000～2003 年，波动减少期。该阶段建三江分局水田种植面积及比例具有交替增减的波动特征，整体具有逐渐减少的态势。水田面积平均降幅为 17764.44hm²/a，水田种植比例年平均降幅为 4.32%，这是建三江分局响应《中国湿地保护行动计划》(2000)[18]、《全国湿地保护工程规划（2002～2030 年）》(2002)[19,20]、《退耕还林条例》(2002)[21,22]等国家退耕还湿、退耕还林还草政策的结果；第五阶段：2004～2009

年，迅速反弹期。该阶段建三江分局水田种植面积迅速增长，平均增幅为54630.67hm²/a，水田种植比例具有先增加后降低的特征，年平均比例为67%，维持在较高水平，2007年，水稻种植比例为80.5%，达到历史峰值，说明水稻在建三江分局农业种植结构中占有绝对重要的位置，这是建三江分局响应《全国粮食生产发展规划（2006～2020年）》(2006)[23,24]、《水稻优势区域布局规划（2008～2015年）》(2008)[25]、《黑龙江省三江平原“两江一湖”干流沿岸灌区规划》(2005)[26]、《黑龙江省三江平原“两江一湖”地区水稻生产基地建设规划》(2007)[27,28]、《黑龙江省国家粳稻基地建设规划》(2006)[29,30]等国家及黑龙江省粮食生产发展政策的结果。

水田灌溉用水历来是农业用水中的大户[31]。2009年，建三江分局井灌水田面积达到481350hm²，水田用水定额按照350m³/亩（即5250m³/hm²）[4]进行匡算，井灌水田用水量达到252709万m³，占地下水用水总量（256790万m³）的98.4%，占农业用水总量（263235万m³）的96%。同时，长期以来，建三江分局水稻灌溉以地下水为主[5]，井灌水田比例高，因此，水田面积的发展变化是当地地下水位动态变化的关键驱动因子。

二、建三江分局水田灌溉可用水量分析预测

由第五章建三江分局各分区地下水埋深预测结果可知，2008～2011年，建三江分局北区年平均地下水埋深为9.96m，超出地下水理想埋深3.96～5.96m；中区年平均地下水埋深为10.02m，超出地下水理想埋深4.02～6.02m，但地下水埋深有逐年缓慢减小的趋势；南区年平均地下水埋深为10.49m，超出地下水理想埋深4.49～6.49m，且地下水埋深有逐年增大的趋势。因此，建三江分局南区地下水位发展状况最差，应严格控制地下水开采，中区地下水位发展状况较为乐观，北区地下水位发展状况居中，但由于超过地下水理想埋深较多，也应适当控制地下水开采，逐步涵养地下水资源。根据上述分析，结合地下水开采强度分级标准（见表7-2[32,33]），确定建三江分局各分区2015年、2020年、2025年及2030年地下水开采程度，见表7-3。

表7-2　地下水开采强度分级标准

开采率（%）	>120	100～120	80～100	60～80	30～60	<30
开采强度	严重超采	超采	基本平衡	较高	中等	低

注　开采率（%）=地下水开采量/地下水可开采量×100%。

表7-3　建三江分局各分区地下水开采程度中长期规划

分　区	地下水开采率/开采强度			
	2015年	2020年	2025年	2030年
北区	65%/较高	55%/中等	45%/中等	25%/低
中区	75%/较高	65%/较高	55%/中等	35%/中等
南区	50%/中等	40%/中等	30%/中等	20%/低

建三江分局位于黑龙江、松花江、乌苏里江汇流的河间地带[16,38]，辖区内三大水系地表水资源可利用率见表7-4[35,36]。结合表7-4，根据三大水系地表水资源可利用率的平均情况，取建三江分局地表水资源可利用率上限为32%，进而确定建三江分局各分区



2015 年、2020 年、2025 年及 2030 年地表水利用率，见表 7-5。

表 7-4 建三江分局三大水系地表水资源可利用率

水　系	黑　龙　江	松　花　江	乌　苏　里　江
水资源可利用率（%）	20～35.8	20～39	35～41.5

表 7-5 建三江分局各分区地表水利用率中长期规划

分　区	地表水利用率（%）			
	2015 年	2020 年	2025 年	2030 年
北区	15	20	25	30
中区	15	20	25	30
南区	15	20	25	30

注　地表水利用率指当地产地表水资源利用率。

建三江分局地下水可开采量及地表水资源量按多年平均值计；目前，建三江分局四大临江灌区——八五九灌区（Ⅱ期）、勤得利灌区、青龙山灌区和前哨灌区均已列入全省 14 个大型灌区建设规划之中[37]，预计建三江分局 2015 年、2020 年、2025 年及 2030 年过境水利用率将分别达到多年平均过境水资源量（2739 亿 m^3[4]）的 0.25%、0.4%、0.55%及 0.7%；2009 年，建三江分局农业用水量占总用水量的 99.58%，考虑到未来人们生活水平的提高及环境用水的增加，建三江分局未来规划年农业用水比例按 98%计；考虑到未来旱田灌溉面积会逐渐增加，建三江分局未来规划年水田用水比例按农业用水量的 95%计。再结合表 7-3 和表 7-5，即可估算出建三江分局各分区 2015 年、2020 年、2025 年及 2030 年水田灌溉可用水量，结果见表 7-6。由表 7-3、表 7-4 和表 7-6 可以看出，虽然对建三江分局各分区地下水开采强度进行了严格的控制，地下水开采量逐渐减少，但随着当地产地表水及过境水利用率逐渐提高，建三江分局未来水田灌溉可用水量会逐渐增加，从而不仅可以满足水田灌水需求，而且可以有效地涵养地下水资源。

表 7-6 建三江分局各分区未来水田灌溉可用水量估算结果

分　区	农　场	水田灌溉可用水量（亿 m^3）			
		2015 年	2020 年	2025 年	2030 年
北区	青龙山	0.8686	1.0879	1.3073	1.4687
	勤得利	1.1864	1.4079	1.6294	1.7602
	浓江	0.8072	1.0396	1.2720	1.4571
	鸭绿河	0.7837	1.0187	1.2537	1.4447
	前哨	0.9137	1.1433	1.3728	1.5429
中区	创业	0.8230	1.0501	1.2773	1.4585
	前进	1.0003	1.2164	1.4326	1.5829
	洪河	0.9269	1.1515	1.3760	1.5441
	前锋	1.4826	1.6807	1.8788	1.9599
	二道河	0.8320	1.0658	1.2996	1.4886

续表

分　区	农　场	水田灌溉可用水量（亿 m^3）			
		2015 年	2020 年	2025 年	2030 年
南区	七星	1.0574	1.2460	1.4347	1.6233
	大兴	0.9158	1.1150	1.3141	1.5132
	红卫	0.7812	1.0062	1.2312	1.4562
	胜利	0.8571	1.0917	1.3264	1.5610
	八五九	1.0866	1.3058	1.5250	1.7443
合计		14.3225	17.6266	20.9309	23.6056

三、建三江分局农作物播种面积分析预测

2008 年 10 月，国务院发布了《全国土地利用总体规划纲要（2006～2020 年）》（以下简称《纲要》），《纲要》规划目标为：到 2010 年和 2020 年，全国耕地保有量分别保持在 18.18 亿亩和 18.05 亿亩[38,39]。近几年来，建三江分局严格执行国家土地政策，结合黑龙江垦区小城镇建设中的“撤队建区”[40,41]改革，复垦了部分土地，再加上适度开垦荒地，使得耕地面积稳中有升。从 2009 年《建三江农垦统计年鉴》中收集到建三江分局 2009 年各农场耕地面积，绘制直方图，如图 7－2 所示。由图 7－2 可以看出，八五九农场、七星农场、前锋农场耕地面积较大，分别达到 84000hm²、75333hm² 和 71334hm²，均超过了 100 万亩，即使是耕地面积最小的鸭绿河农场也达到了 27466hm²，超过了 40 万亩。2009 年，建三江分局耕地达到 710244hm²，超过了 1000 万亩，占黑龙江垦区耕地总面积（约为 4000 万亩[42,43]）的 26.6%，充分说明了建三江分局在黑龙江垦区中的重要地位。考虑建设用地的影响，建三江分局 2009～2015 年、2016～2020 年、2021～2025 年及 2026～2030 年耕地年平均损失率分别按 0.4%、0.3%、0.2%及 0.1%估计；2009 年，建三江分局后备耕地资源为 56292hm²，为了保证土地资源可持续利用，2009～2015 年、2016～2020 年、2021～2025 年及 2026～2030 年，后备耕地资源开垦率均按 2009 年后备耕地资

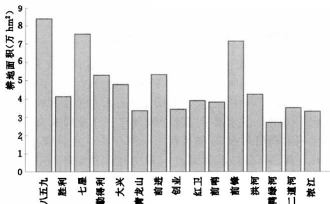


图 7－2　建三江分局 2009 年各农场耕地面积直方图

源的10%计；一般来说，对于农作物一年一熟地区，由于国家粮食价格、粮食政策[44-48]（包括其他农作物）等因素的影响，农作物播种面积往往略小于耕地面积。建三江地区复种指数为1，经过计算，建三江分局近几年农作物播种面积占耕地面积比例均超过99%，耕地闲置率很低，随着未来国家粮食政策的调整，垦区政府及农民种粮积极性会进一步提高，建三江分局未来农作物播种面积占耕地面积比例按100%计（即认为农作物播种面积与耕地面积相等），从而可以估算出建三江分局各分区2015年、2020年、2025年及2030年农作物播种面积，结果见表7-7。

表7-7　　建三江分各分区局未来农作物播种面积估算结果

分　区	农　场	农作物播种面积（hm^2）			
		2015年	2020年	2025年	2030年
北区	青龙山	32854	32392	32098	31965
	勤得利	52201	52013	52086	52417
	浓江	32508	32250	32155	32221
	鸭绿河	27121	27024	27062	27234
	前哨	37557	37132	36898	36849
中区	创业	33723	33752	33947	34309
	前进	52130	51677	51487	51554
	洪河	41704	41133	40775	40623
	前锋	70695	70697	71049	71751
	二道河	34224	33880	33709	33707
南区	七星	74386	74120	74225	74698
	大兴	47383	47136	47126	47351
	红卫	37827	37341	37048	36942
	胜利	40561	40295	40234	40373
	八五九	82496	81758	81436	81522
合计		697370	692600	691335	693516

四、建三江分局水田适宜发展规模分析预测

建三江分局2009年水田面积达到49.1万hm^2，占黑龙江垦区水田总面积（109.2万hm^2[49]）的45%，是黑龙江垦区的水稻大户。目前，建三江分局水稻常规净灌溉定额$I_{净}$一般为400m^3/亩（即6000m^3/hm^2）[50,51]，与黑龙江省水利厅提出的水稻控制灌溉技术$I_{净}$目标250～350m^3/亩[52]相比，节水潜力很大。预计建三江分局未来渠道衬砌率会大幅度提高，地表水灌区渠系水利用系数$\eta_{渠}$将达到0.8左右[53]，井灌区$\eta_{渠}$按0.9计[54]，井渠合灌区$\eta_{渠}$按0.85计，建三江分局水稻灌区$\eta_{渠}$取上述3种灌区的平均情况，按0.85计，同时由于建三江分局地下水形势非常严峻，大力推广水田节水灌溉技术势在必行，未来水田灌溉必然以非充分灌溉为主，水田田间水利用系数$\eta_{田}$按0.95计[55]，因此，建三江分局水稻灌区未来灌溉水利用系数$\eta_{水}=0.85\times0.95=0.81$，再由毛灌溉定额$I_{毛}=I_{净}/$

$\eta_水$[56,57]，可以得到建三江分局水稻常规灌溉 $I_毛=400/0.81=494m^3$/亩（即 $7410m^3/hm^2$），中等节水（节水 15%）$I_毛=400\times0.85/0.81=420m^3$/亩（即 $6300m^3/hm^2$），高度节水（节水 30%）$I_毛=400\times0.7/0.81=346m^3$/亩（即 $5190m^3/hm^2$）。进而从涵养地下水资源角度出发，确定建三江分局 2015 年、2020 年、2025 年及 2030 年水田灌溉方案，见表 7-8。

表 7-8　　建三江分未来水田灌溉方案

年份	水田灌溉方案	综合毛灌溉定额 $I_毛$（m^3/hm^2）
2015	常规灌溉 75%，控制灌溉 25%（15%中等节水，10%高度节水）	7022
2020	常规灌溉 50%，控制灌溉 50%（25%中等节水，25%高度节水）	6578
2025	常规灌溉 25%，控制灌溉 75%（35%中等节水，40%高度节水）	6134
2030	控制灌溉 100%（50%中等节水，50%高度节水）	5745

根据表 7-6～表 7-8 估算建三江分局 2015 年、2020 年、2025 年及 2030 年水田适宜发展面积及比例，结果见表 7-9、图 7-3 及图 7-4。

表 7-9　　建三江分局未来水田适宜发展面积及比例估算结果

分区	农场	水田适宜发展面积（hm^2）				水田适宜种植比例（%）			
		2015 年	2020 年	2025 年	2030 年	2015 年	2020 年	2025 年	2030 年
北区	青龙山	12370	16538	21312	25565	37.65	51.06	66.40	79.98
	勤得利	16895	21403	26563	30639	32.37	41.15	51.00	58.45
	浓江	11495	15804	20737	25363	35.36	49.01	64.49	78.72
	鸭绿河	11161	15486	20439	25147	41.15	57.31	75.52	92.34
	前哨	13012	17381	22380	26856	34.65	46.81	60.65	72.88
	小计	64933	86612	111431	133570	35.63	47.90	61.80	73.92
中区	创业	11720	15964	20823	25387	34.75	47.30	61.34	74.00
	前进	14245	18492	23355	27553	27.33	35.78	45.36	53.44
	洪河	13200	17505	22432	26877	31.65	42.56	55.01	66.16
	前锋	21114	25550	30629	34115	29.87	36.14	43.11	47.55
	二道河	11848	16202	21187	25911	34.62	47.82	62.85	76.87
	小计	72127	93713	118426	139843	31.03	40.54	51.27	60.29
南区	七星	15058	18942	23389	28256	20.24	25.56	31.51	37.83
	大兴	13042	16950	21423	26339	27.52	35.96	45.46	55.63
	红卫	11125	15296	20072	25347	29.41	40.96	54.18	68.61
	胜利	12206	16596	21624	27171	30.09	41.19	53.74	67.30
	八五九	15474	19851	24861	30362	18.76	24.28	30.53	37.24
	小计	66905	87635	111369	137475	23.67	31.23	39.76	48.94
合计		203965	267960	341226	410888	29.25	38.69	49.36	59.25

注　表中水田适宜种植比例=水田面积/农作物播种面积×100%。

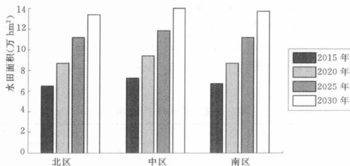


图 7-3　建三江分局未来水田适宜发展面积直方图

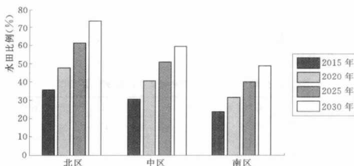


图 7-4　建三江分局未来水田适宜种植比例直方图

由表 7-9 可以看出，考虑到地表水利用率不可能很快提高，若要维护建三江分局的地下水资源安全，就必须严格控制地下水开采强度，适当削减水田面积，到 2015 年，水田面积应由 2009 年的 491427hm² 减少到 203965hm²，平均降幅为 47910hm²/a，否则会由于盲目扩展水田面积造成地下水位不可恢复的降低。而 2015 年之后，虽然继续执行控制地下水开采政策，但国家从粮食安全与水安全的角度出发，必然会加大建三江分局的水利投入力度，四大灌区将会陆续投入运行，地表水利用率必然会逐步提高，从而逐渐减小井灌区的规模，使得建三江分局的水稻生产由“地下水依赖型”向“地表水为主、地下水为辅型”转变，从而有效涵养地下水资源，使地下水资源系统进入良性循环。由表 7-9、图 7-3 及图 7-4 可以看出，在上述规划方案下，2015～2030 年，建三江分局水田面积及比例将呈逐渐增长的态势。水田面积将由 203965hm² 增加到 410888hm²，平均增幅为 13795hm²/a，年平均增长率为 6.8%，其中，南区贡献率最高，平均增幅为 4705hm²/a，年平均增长率为 7.0%，中区贡献率最低，平均增幅为 4514hm²/a，年平均增长率为 6.3%，北区居中，但各分区差别不大，基本呈现均衡发展的特征；水田种植比例由 29.25%增加到 59.25%，年平均增幅为 2.00%，其中，北区增长最明显，年平均增幅为 2.55%，南区增长最弱，年平均增幅为 1.68%，中区居中，各分区年平均增幅具有从北向南逐渐降低的特征。

第三节　推广水田节水灌溉技术，推进节水农业发展

在《全国节水农业发展规划》中指出，全国各地要因地制宜地推广包括水稻控制灌溉在内的高效节水灌溉技术，到2015年，全国要推广水稻节水栽培面积1亿亩[58]。在《全国节水灌溉规划》中指出，到2020年，全国节水灌溉面积要达到7.65亿亩，节水能力要达到600亿m^3/a[59]，为此，要大力加强节水灌溉技术的试验、研究与示范，其中，东北水稻灌区要全面推广干湿交替灌溉制度[60]。国务院在《全国水资源综合规划》的批复中指出，要加强灌区节水改造和田间高效节水灌溉，大力发展农业节水，以全面推进节水型社会建设[61]。建三江分局作为国家绿色水稻生产基地，在水资源开发利用不平衡（地下水为主、地表水为辅）、利用效率低下、管理粗放等原因诱发了地下水局部超采、水资源短缺、水环境恶化等问题的背景下，积极顺应农业形势发展需求，大力发展水田节水灌溉技术，是建三江分局义不容辞的责任。

水田节水技术包括工程节水措施（渠道衬砌[62,63]、低压管道输水[64-66]等）和非工程节水措施（以节水灌溉制度为核心）[67,68]。其中，推广水田节水灌溉技术是实现水田节水的重要途径，是发展节水农业的根本保障。目前，已经比较成熟的水田节水灌溉技术包括无水层灌溉、薄露灌溉、浅—薄--湿—晒灌溉、干湿交替灌溉、湿润灌溉、间歇灌溉及控制灌溉等[69]，这些技术在实践中得到了广泛的应用，并取得了较好的效果。在辽宁省盐碱地利用研究所试验基地进行的水稻无水层灌溉试验结果表明：该种水稻节水灌溉技术比充分灌溉方式节约灌溉水量1887m^3/hm^2，节水幅度为21.6%[70]；在浙江省平湖、永康及金清3个灌溉试验站进行的水稻薄露灌溉试验结果表明：该种水稻节水灌溉技术比传统淹灌方式平均节约灌溉水量1622m^3/hm^2，平均节水幅度为39%[71]；在虎林市宝东镇进行的水稻“浅、湿、晒”灌溉试验结果表明：该种水稻节水灌溉技术比传统淹灌方式节水2871m^3/hm^2[72]；在中国水稻研究所试验场进行的强化栽培条件下水稻干湿交替灌溉试验结果表明：该种水稻节水灌溉技术比浅水层灌溉方式（搁田期除外）节水34%[73]；在庆安县和平灌区水稻试验站进行的水稻湿润灌溉试验结果表明：该种水稻节水灌溉技术比常规淹灌方式节水67%，比“浅晒浅湿”灌溉方式节水45%[74]；在延寿县永安村、五常水稻所及佳木斯水稻研究所试验地进行的水稻间歇灌溉试验结果表明：该种水稻节水灌溉技术比常规淹灌方式平均节约灌溉水量2270m^3/hm^2，平均节水幅度为20%[75]；在汤原县汤旺河灌区灌溉试验站进行的水稻控制灌溉试验结果表明：该种水稻节水灌溉技术比常规淹灌方式节约灌溉水量3834m^3/hm^2，节水幅度为44.2%[76]。

在上述水稻节水灌溉技术中，控制灌溉是一种行之有效的水稻节水技术，近些年来得到了广泛的推广与应用。水稻控制灌溉技术的核心内容是在秧苗本田移栽后，田面保持5～25mm的薄水层返青，在之后的各个生育阶段中，田面不再建立灌溉水层，以根层土壤水分作为控制指标（视水稻生育期的不同，土壤水分下限控制值取土壤饱和含水率的60%～80%适宜组合，上限控制值取土壤饱和含水率），确定灌水时间和灌水量[77-79]。2003年，黑龙江省水利厅与彭世彰教授开展了“寒地水稻控制灌溉技术”合作研究[80]，

为水稻控制灌溉技术在黑龙江省大面积推广应用积累了宝贵的经验。近些年来，黑龙江垦区也陆续开展了水稻节水控制灌溉技术的示范与推广工作。在浓江农场第一作业区一号地进行的水稻控制灌溉试验结果表明：控灌Ⅰ比常规灌溉方式平均节约灌溉水量 1884m^3/hm^2，控灌Ⅱ比常规灌溉方式平均节约灌溉水量 2001m^3/hm^2[51]；在八五七农场第五管理区 9 号地进行的水稻控制灌溉试验结果表明：该种水稻节水灌溉技术比常规灌溉方式节约灌溉水量 1846.5m^3/hm^2，节水幅度为 23.1%[81]；在八五二农场第四管理区第五作业站进行的水稻控制灌溉试验结果表明：控灌Ⅰ比常规灌溉方式平均节约灌溉水量 495m^3/hm^2，平均节水幅度为 12.7%，控灌Ⅱ比常规灌溉方式平均节约灌溉水量 570m^3/hm^2，平均节水幅度为 14.7%[82]；在八五六农场水田试验站进行的水稻控制灌溉试验结果表明：控灌Ⅰ比常规灌溉方式节约灌溉水量 3750m^3/hm^2，节水幅度为 38.5%，控灌Ⅱ比常规灌溉方式节约灌溉水量 3000m^3/hm^2，节水幅度为 30.8%[83]；在八五六分公司水田试验站进行的水稻控制灌溉试验结果表明：控灌Ⅰ比常规灌溉方式节约灌溉水量 1260m^3/hm^2，节水幅度为 20.6%，控灌Ⅱ比常规灌溉方式节约灌溉水量 1830m^3/hm^2，节水幅度为 29.9%[84]；在八五七农场水田试验区进行的水稻控制灌溉试验结果表明：控灌Ⅰ比常规灌溉方式平均节约灌溉水量 2505m^3/hm^2，平均节水幅度为 37.7%，控灌Ⅱ比常规灌溉方式平均节约灌溉水量 2621m^3/hm^2，平均节水幅度为 39.5%[85]。

由上述分析可知，控制灌溉是一种水稻节水灌溉新技术。结合《黑龙江省水稻节水控制灌溉技术推广实施方案》，建三江分局今后应以大力推广水稻节水控制灌溉技术为主要手段，推进当地节水农业的发展。根据前述分析计算，可取常规灌溉 $I_{毛}=7407m^3/hm^2$，控制灌溉 $I_{毛}=5556m^3/hm^2$，控制灌溉面积发展比例按照 25%（2015 年）、50%（2020 年）、75%（2025 年）及 100%（2030 年）计，再结合表 7-6 即可估算出控制灌溉条件下建三江分局 2015 年、2020 年、2025 年及 2030 年相比较常规灌溉的水稻灌溉节水量，结果见表 7-10 和图 7-5。

表 7-10　　控制灌溉条件下建三江分局未来水稻灌溉节水量估算结果

分区	常规灌溉条件下水田面积（hm^2）				水稻灌溉节水量（亿 m^3）			
	2015 年	2020 年	2025 年	2030 年	2015 年	2020 年	2025 年	2030 年
北区	61558	76919	92280	103599	0.2849	0.7119	1.2811	1.9176
中区	68379	83225	98073	108465	0.3164	0.7702	1.3615	2.0077
南区	63428	77828	92229	106629	0.2935	0.7203	1.2804	1.9737
合计	193365	237972	282582	318693	0.8948	2.2024	3.9230	5.8990

由表 7-10 和图 7-5 可以看出，在上述规划方案下，2015～2030 年，建三江分局水稻灌溉节水量将呈逐渐增长的态势。水稻灌溉节水量将由 0.8948 亿 m^3 增加到 5.8990 亿 m^3，平均增幅为 0.3336 亿 m^3/a，年平均增长率为 37.28%，其中，中区增幅最高，平均增幅为 0.1128 亿 m^3/a，但增长率最低，年平均增长率为 35.64%；北区增幅最低，平均增幅为 0.1088 亿 m^3/a，但增长率最高，年平均增长率为 38.21%；南区居中，但各分区差别不大，基本呈现均衡发展的特征。

若将节约的水量用于发展水田面积，水稻仍然采用控制灌溉方式（$I_{毛}=5556m^3/$

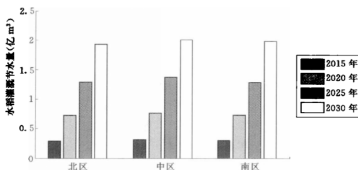


图 7-5　控制灌溉条件下建三江分局未来水稻灌溉节水量直方图

hm^2)，则可以估算出控制灌溉条件下建三江分局 2015 年、2020 年、2025 年及 2030 年可新增的水田面积，结果见表 7-11 和图 7-6。

表 7-11　　控制灌溉条件下建三江分局未来可新增水田面积估算结果

分　区	可新增水田面积（hm^2）			
	2015 年	2020 年	2025 年	2030 年
北区	5128	12813	23058	34514
中区	5695	13862	24505	36136
南区	5283	12964	23045	35524
合计	16106	39639	70608	106174

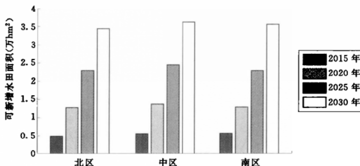


图 7-6　控制灌溉条件下建三江分局未来可新增水田面积直方图

由表 7-11 和图 7-6 可以看出，在上述规划方案下，2015～2030 年，建三江分局可新增水田面积将呈逐渐增长的态势。可新增水田面积将由 16106hm^2 增加到 106174hm^2，平均增幅为 6005hm^2/a，年平均增长率为 37.28%，其中，中区增幅最高，平均增幅为 2029hm^2/a，但增长率最低，年平均增长率为 35.63%；北区增幅最低，平均增幅为 1959hm^2/a，但增长率最高，年平均增长率为 38.20%；南区居中，但各分区差别不大，基本呈现均衡发展的特征。

第四节 提升防灾减灾能力，推进粮食产能工程建设

在全球气候变化以及人类活动的影响下，我国干旱、洪涝、雹灾等自然灾害频繁发生，并有逐渐加剧的趋势[46,86]。以旱灾、洪涝灾害为主的农业自然灾害是区域粮食增产的主要限制因子[87,88]，因此，要实现粮食增产，保障粮食安全，就必须采取适当措施，提升区域防灾减灾能力。在《全国新增1000亿斤粮食生产能力规划（2009～2020年）》中指出，要通过防洪除涝与抗旱、农业气象防灾减灾等防灾减灾重点工程建设，构建防灾减灾体系，为实现新增500亿kg粮食生产能力目标提供支撑[89]。2010年12月20～21日，黑龙江省委经济工作会议在哈尔滨召开，会议强调，2011年黑龙江省经济工作的主要任务就是继续深入推进“八大经济区”和“十大工程”建设，其中就包括要大力抓好大水利化建设，推进防洪除涝、抗旱兴利、节水灌溉等方面工程建设，以巩固提高“千亿斤粮食产能工程”[90]。可见，无论从国家层面，还是从区域层面，都将提升防灾减灾能力作为保障粮食安全的重要途径。

一、建三江分局旱涝灾害统计分析

从《建三江农垦统计年鉴》（2009年）中收集到建三江分局历年旱涝灾害成灾面积，绘制变化曲线，见图7-7。再依据《建三江农垦统计年鉴》（2009年）中收集到的建三江分局历年农作物总播种面积计算旱涝灾害成灾率，并绘制变化曲线，见图7-8。

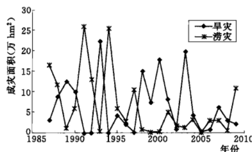


图7-7 建三江分局旱涝灾害成灾面积变化曲线（1987～2009年）

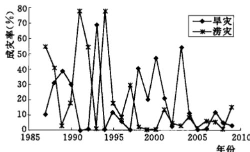


图7-8 建三江分局旱涝灾害成灾率变化曲线（1987～2009年）

由图7-7和图7-8可以看出，虽然建三江分局经过几十年建设，已经初步构建了防洪、除涝、灌溉三大工程体系，但由于水利配套工程不完善、设计标准低（建三江分局现有的710244hm^2耕地中，达到3～5年一遇以上配套标准的仅为464667hm^2，占65.4%）、防洪除涝骨干工程缺口大、农田排水大环境急需改善（1977～2009年，国家批复建三江分局水务局防洪除涝骨干工程建设经费7.76亿元，但目前仅投入资金3.72亿元，不足

50%，致使很多半截子工程无法继续建设）、抗旱设备不足［建三江分局现有喷灌机 2222 台（套），喷灌能力 56667hm²，还有 104667hm² 的旱田抗旱无法保障］等原因[4,91]，使得农田抗御自然灾害的能力仍处于较低水平，旱涝灾害频繁发生，致使粮食减产，农民减收。1993 年，建三江分局旱灾成灾面积达到历史第一峰值 224843hm²（超过 330 万亩），旱灾成灾率也达到历史第一峰值 68.66%（接近 70%）；2003 年，建三江分局旱灾成灾面积达到历史第二峰值 198166hm²（接近 300 万亩），旱灾成灾率也达到历史第二峰值 54.03%（超过 50%）。在 1987～2009 年 23 年中，旱灾成灾率超过 30%的年份就有 6 年，占 26%。1991 年，建三江分局涝灾成灾面积达到历史第一峰值 259528hm²（接近 400 万亩），涝灾成灾率也达到历史第一峰值 78.36%（接近 80%）；1994 年，建三江分局涝灾成灾面积达到历史第二峰值 255676hm²（超过 380 万亩），涝灾成灾率也达到历史第二峰值 77.48%（接近 80%）。在 1987～2009 年 23 年中，涝灾成灾率超过 40%的年份就有 5 年，占 22%。上述分析充分说明建三江分局防灾减灾工作任重而道远，急需构建防灾减灾体系，提升防灾减灾能力。由图 7－8 可以看出，1998 年以来，建三江分局涝灾成灾率均控制在 20%以下，这充分说明了水利工程建设（包括骨干控制工程和田间配套工程）在防灾减灾体系中的重要作用。

二、建三江分局抗旱除涝工作重点

根据第六章建三江分局各分区复杂降水序列多时间尺度变化特征统计分析成果，制定建三江分局未来抗旱除涝工作重点，见表 7－12。

表 7－12　　建三江分局各分区未来抗旱除涝工作重点

分　区	时　段（年）	工　作　重　点
北区	2011～2014	抗春旱
	2015～2022	抗春涝
	2011～2020	抗夏涝
	2011～2021	抗秋涝
	2011～2019	抗冬旱
中区	2011～2013	抗春旱
	2014～2022	抗春涝
	2011～2024	抗夏涝
	2011～2023	抗秋涝
	2011～2017	抗冬旱
南区	2011～2021	抗春旱
	2011～2017	抗夏涝
	2011～2017	抗秋涝
	2018～2028	抗秋旱
	2010～2020	抗冬旱



三、建三江分局抗旱除涝对策

（一）建三江分局抗旱对策

我国在应对旱情的实践中积累了大量的经验，具体抗旱措施包括工程措施和非工程措施[92,93]。

1. 工程措施

抗旱工程措施包括骨干控制性工程（蓄水、引水及提水工程[92]）、田间配套工程（渠系建筑物、渠道衬砌等[94]）、旱田喷微灌工程[95]、抗旱应急水源工程（机电井等）[96]等。近些年来，建三江分局虽然通过提前检修喷灌设备与机电井、抢打应急抗旱井、利用开江高水位与拦蓄“桃花水”提前灌水等方式[97]，在一定程度上缓解了旱情，但由于水利建设资金缺口大，抗旱工程难以充分发挥效益，因此，旱灾仍然频繁发生。今后，建三江分局应结合《三江平原水利综合规划》[98]（已进入报批阶段[99]）、《黑龙江省人民政府关于加快水利建设大力发展现代水利的决定》（2008 年）[100]，积极争取专项建设资金，加快四大临江灌区建设进度，提高供水能力，解决“工程型缺水”问题，购置大型喷灌设备，提高旱田抗旱能力；同时应结合《农业供水末级渠系改造试点项目管理办法（试行）》[101]，积极争取灌区末级渠系改造试点项目[102]，减少输水损失，提高灌溉保证率；另外，建三江分局还应多渠道筹集建设资金，构建抗旱应急水源工程体系，包括抢打、多打抗旱水源井，增打水田补水井[97]，利用地势因地制宜地修建塘坝、小水库等拦蓄地表径流[4]，也可以在现有的排涝渠系中修建永久闸门和简易闸门，用以拦蓄降水和水田排水，提高雨洪资源及水田弃水利用率，实现“涝水旱用、闲水忙用、弃水再用”[103]，以提升抗旱减灾能力。

2. 非工程措施

抗旱非工程措施包括耕作措施（秋季深翻[104,105]、田间秸秆覆盖技术[104]、少耕免耕技术[104,106]等）、栽培措施（坐水种[104,107]、地膜覆盖技术[104-106]、节水灌溉技术等）、化学措施（保水型种衣剂、抗旱剂[104-106]等）、采用抗旱品种[105,106,108]、合理调整农作物种植结构[105,107,108]、人工降雨措施[95,107,108]、制度措施（抗旱法律法规）[92,93,109]及建立旱情监测预警系统与抗旱指挥调度系统[92,109]等。近些年来，建三江分局抗旱减灾主要以工程措施为主，对抗旱非工程措施重视力度不够，尚未建立起有效的抗旱减灾技术体系。今后，建三江分局应加大抗旱耕作措施、栽培措施、化学措施推广示范力度；选用或培育当地适宜的抗旱品种；对于水源确实无法保障的水田区，引导农民实行水改旱；依据气象条件，适时实施人工降雨；依据《中华人民共和国抗旱条例》[110]和《黑龙江省干旱灾害应急预案》[111]，编制《建三江分局干旱灾害应急预案》；筹措资金，建立建三江分局旱情监测预警系统与抗旱指挥调度系统，提高旱情预警与调控能力，建立长效抗旱机制。

（二）建三江分局除涝对策

建三江分局地处三江平原腹地，平均海拔 56m，地面坡降为 1/5000～1/12000[16,112]，地势低平，多年来当地农业一直受“三江下梢、十年九涝”的困扰，属于传统涝区[103]。我国在涝灾治理方面积累了丰富的经验，除涝措施包括工程措施和非工程措施[113,114]。



1. 工程措施

除涝工程措施包括骨干除涝工程（总干沟、堤防、排水闸、排涝泵站等[91,113,114]）、面上配套除涝工程（干沟、支沟、斗沟等[91,113,115]）、疏浚排水沟道或河道[113,114]等措施。建三江分局今后应按照规划申请国家专项资金，尽快建设堤防（22.4km）、骨干沟道（1121.87km）、排涝泵站（24座）等骨干排涝工程；建设干沟（10条）、支沟（2396条）、斗沟（12533条）、农沟（2838条）、强排站（25座）等田间配套排涝工程[4]；加大排水沟（河）道的清淤力度，提高行洪除涝能力；提高排涝工程除涝标准，建议田间配套排涝工程为5年一遇[116]，骨干排涝工程为10年一遇[117]，从而建立有效的除涝工程体系。

2. 非工程措施

除涝非工程措施包括制定防洪除涝预案[118]、建立洪涝灾情评估与减灾决策支持系统[113]、调整农业种植结构与产业结构（旱改水、退耕还湖、发展水产养殖等[113,114]）等。今后建三江分局应在低洼易涝地区选用耐淹旱作品种或实行旱改水；对于地势过于低洼、排水成本过高的地区，应引导农民退垦还湿、还湖，发展多种经营；依据《国家防汛抗旱应急预案》[119]、《黑龙江省洪水灾害应急预案》[120]，编制《建三江分局洪涝灾害应急预案》；筹措资金，建立建三江分局洪涝灾情评估与减灾决策支持系统，提高洪涝灾害预警与调控能力，建立长效抗涝机制。

第五节　控制化肥农药施用量，推进环境友好型社会建设

在世界农业发展史中，化肥和农药作为重要的农业生产资料，对于粮食增产起到了巨大的推进作用[121,122]。我国是世界人口大国，为了保障粮食安全，必然要大量施用化肥和农药。近些年来，我国化肥、农药施用量逐年增长[123]。目前，我国已经成为世界化肥、农药使用大国。据统计，目前我国化肥施用量已超过350kg/hm^2，远远超过国际化肥施用安全上限225kg/hm^2[124,125]，每公顷农药用量是美国的两倍多[126]。长期以来，我国化肥、农药有效利用率低下，氮、磷、钾肥有效利用率分别为30%、20%和40%左右，平均为30%左右（发达国家为50%左右）[127]，农药有效利用率仅为20%～30%（发达国家为60%～70%）[126]。长期以来，由于在农业生产活动中过量、不合理地施用化肥、农药，使得大量未被作物利用的氮、磷等营养物质、农药通过地表径流、农田排水和地下渗漏进入地表（下）水，导致水质恶化，加剧了农业非点源污染[128-130]，引起了各界的高度关注。在《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十一个五年规划的建议》中明确提出，要建设环境友好型社会[131]，而控制化肥、农药施用量正是建设环境友好型社会的重要途径之一[132]。

一、建三江分局化肥农药施用量统计分析

从历年《建三江农垦统计年鉴》中收集到建三江分局化肥农药施用总量，再依据《建三江农垦统计年鉴》(2009) 中收集到的建三江分局历年农作物总播种面积计算单位面积化肥农药施用量，并绘制变化曲线，如图7-9和图7-10所示。



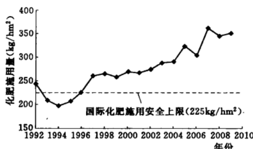


图 7-9 建三江分局化肥施用量变化曲线（1992～2009 年）

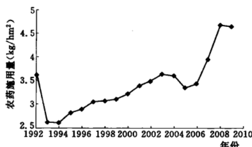


图 7-10 建三江分局农药施用量变化曲线（1992～2009 年）

由图 7-9 可以看出，建三江分局化肥施用量总体呈逐渐增长的趋势。1992～2009 年，建三江分局化肥施用量由 245kg/hm² 增长到 351kg/hm²，年平均增幅为 6.24kg/hm²，年平均增长率为 2.55%。同期全国化肥平均施用量由 197kg/hm² 增长到 341kg/hm²[133,134]，可见，建三江分局化肥施用量略高于同期全国平均水平。同时，除了 1993～1995 年 3 个年份之外，建三江分局其余年份的化肥施用量均高于发达国家为防止化肥污染而设置的安全上限（225kg/hm²）。

由图 7-10 可以看出，建三江分局农药施用量总体呈逐渐增长的趋势。1992～2009 年，建三江分局农药施用量由 3.62kg/hm² 增长到 4.65kg/hm²，年平均增幅为 0.06kg/hm²，年平均增长率为 1.67%。同期全国农药平均施用量由 5.33kg/hm² 增长到 10.77kg/hm²[133,134]。虽然建三江分局农药施用量低于同期全国平均水平，但农药施用结构中主要以化学除草剂为主。

由上述分析可知，建三江分局在化肥农药利用上主要以“数量型”为主，与发达国家相比仍处于较低水平，因此，当地应积极采取对策，控制化肥、农药使用量，提高化肥、农药有效利用率，以推动环境友好型社会建设。

二、建三江分局化肥农药施用对策

（一）建三江分局化肥施用对策

我国在长期的农业生产实践中，已经探索出叶面施肥、分次施肥、湿润施肥、测土配方施肥、化肥深施、秋季施肥、飞机施肥、液态施肥、定点施肥等科学施肥方法[135]，对于提高肥效、保护环境起到了积极的促进作用。虽然建三江分局通过实施测土配方施肥项目，使全局测土配方施肥面积达到了 20 万 hm²，肥料有效利用率提高了 5%，实现年节肥 6000t[136]，但与发达国家相比，化肥有效利用率仍然偏低。建三江分局是水稻种植大局，而水田氮、磷负荷量是旱田的 4 倍以上，水田氮、磷流失是造成农药非点源污染的主要原因[135]。因此，今后建三江分局应根据土壤肥力及作物需肥规律[137]，大力推广上述科学施肥技术，特别是水稻科学施肥技术，以提高化肥有效利用率。同时，应增施有机肥（包括农家肥）[138]、复合肥[139]、缓释肥[140]及生物肥[141]，以降低化肥用量，实现平衡施肥[142,143]，控制农业非点源污染，促进当地生态环境的良性循环。

（二）建三江分局农药施用对策

农药的施用对于防治病、虫、草、鼠害、保障粮食稳产增产有巨大的推动作用。但长期以来，农药不合理的使用也造成了农药急性中毒、农药残留超标、农药环境激素效应及生态环境恶化等负面效应[122,144]。为了应对上述农药负面效应，保障人畜生命安全，我国政府陆续出台了《农药安全使用规定》[145]、《农药管理条例》[146]、《农药管理条例实施办法》[147]、《农药合理使用准则（一）～（九）》[148-156]及《农药标签和说明书管理办法》[157]等一系列相关政策法规。近些年来，建三江分局加大了农药使用管理力度，农药施用量低于全国平均水平，但与发达国家相比，农药有效利用率仍然偏低。今后，建三江分局农技推广部门应加大上述法规标准的宣传力度，提高农民安全使用农药的意识；引导农民淘汰“跑冒滴漏”严重、质量低劣的老式喷雾器，采用新型施药机械[158]，改变传统的大容量喷雾技术，采用风送液力式喷雾技术、静电式喷雾技术、超低量和低量喷雾技术、仿形喷雾技术[159]、控滴喷雾技术、循环喷雾技术、反飘喷雾技术[122]、丸粒化施药技术及药辊涂抹技术[160]等农药施用新技术，节省农药施用量，实现精准施药，提高农药有效利用率，控制农药残留，从而推进当地“绿色农业”[161]发展及环境友好型社会建设。

第六节　推进农业水价改革，加快节水型社会建设

我国是一个传统的农业大国，农业用水占全国总用水量的比例高达60％以上[162,163]，而由于工程不配套、用水模式及管理方式粗放等原因，我国农业灌溉水利用系数仅为0.3～0.4左右，远低于发达国家0.7～0.9左右的水平[164,165]，导致农业用水浪费严重，水资源日益短缺，这已经成为我国粮食增产的重要障碍因子。面对水资源日益匮乏的严峻形势，我国提出要大力发展现代节水农业，建设节水型社会。农业节水途径包括工程节水措施和非工程节水措施。工程节水措施往往要依靠政府投入，而非工程节水措施特别是节水灌溉技术的推广，往往要依靠农民节水意识的提高。在我国现实国情下，可以通过加强宣传教育来提高农民的节水意识，但更为有效的手段应是发挥价格杠杆作用，即推行农业水价改革。

我国农业水价变革经历了无偿供水阶段（1949～1964年）、有偿供水阶段（1965～1984年）、水价改革起步阶段（1985～1994年）及水价改革发展阶段（1995年至今）[166,167]。在无偿供水阶段，供水工程建设及维修费用主要靠国家投入[167,168]；在有偿供水阶段，国家颁布了《水利工程水费征收、使用和管理试行办法》（1965年）[167,169]，为有偿供水提供了政策依据；在水价改革起步阶段，国家陆续出台了《水利工程水费核定、计收和管理办法》（1985年）、《中华人民共和国水法》（1988年）、《关于贯彻执行〈水利工程水费核定、计收和管理办法〉的通知》（1990年）、《乡镇供水水价核订原则（试行）》（1991年）[170]，为制定水价提供了政策法律基础，推动了农业水价的改革；在水价改革发展阶段，国家陆续出台了《水利工程供水生产成本费用核算管理规定》（1995年）、《水利产业政策》（1997年）、《关于改革水价促进节约用水的指导意见》（2000年）、《中华人民共和国水法》（2002年）、《水利工程供水价格管理办法》（2003年）[170]，为建立合理的水价形成机制奠定了基础。特别是《水利工程供水价格管理办法》（2003年）中明确了水利

工程供水的商品属性，使得农业水价改革进入了规范化、法制化阶段[166,170]。需要指出的是，目前我国农业水价采取的是政府定价方式，政府在制定农业供水价格时需要考虑当地农民的实际承受能力，使得现行农业水价往往无法补偿供水成本（一般仅占供水成本的30%～60%），导致大部分灌区亏本运营，严重影响了灌区的发展[171]。

黑龙江省依据国家相关水价政策进行了积极的实践，先后出台了《黑龙江省水利工程供水收费标准和使用管理办法》（1987 年）[168]、《关于调整黑龙江省水利工程向农业等供水收费标准的通知》（1997 年）[172]、《黑龙江省实施〈水利工程供水价格管理办法〉细则的通知》（2004 年）[173]等水价政策。在国家及黑龙江省相关水价政策的指导下，1987～1990 年，黑龙江省农业水价标准是：自流灌区水田 0.005～0.007 元/m^3（或 75～105 元/hm^2），旱田 0.005～0.007 元/m^3（或 30～45 元/hm^2）[168,174]；1991～1996 年，黑龙江省农业水价标准是：自流灌区水田 0.01 元/m^3（或 150 元/hm^2），旱田 0.01 元/m^3（或 60 元/hm^2）[168]；1997 年至今，黑龙江省农业水价标准是：自流灌区水田 0.024 元/m^3（或 300 元/hm^2），旱田 0.024 元/m^3（或 150 元/hm^2）[168,175]。上述水费征收办法中虽然规定了“按亩收费”和“按方收费”两种方式，但由于黑龙江省大部分灌区无精确量水设施（甚至没有量水设施），至 2001 年以前，绝大部分灌区一直沿用按亩收费方式[176]，使得水费征收成为一种形式，无法补偿供水成本。同时，采用按亩收费方式，使得农民认为用水多少都一样，缺乏节水积极性，从某种程度上加剧了水资源的浪费，在枯水季节甚至会引起用水纠纷[177]。为了应对传统按亩收费方式的不利后果，2001 年，黑龙江省开始了新一轮水价改革，选择五常市龙凤山灌区、木兰县香磨山灌区、庆安县和平灌区及农垦查哈阳灌区作为农业水价改革试点[168,178]。黑龙江省物价局 2001 年批准了查哈阳灌区农业水价改革方案，批复水价为 0.038 元/m^3[168,179]；2004 年批准了龙凤山、香磨山、和平 3 个试点灌区的农业水价改革方案，批复水价分别为 0.041 元/m^3、0.048 元/m^3、0.040 元/m^3[168,178,180-182]。2004 年，依据国务院办公厅《关于推进水价改革促进节约用水保护水资源的通知》[183,184]的要求，黑龙江省水利厅和物价局联合下发了《关于做好扩大农业水价改革试点工作的通知》，确定了 16 个大型灌区、36 个中型灌区作为农业水价改革试点[185]，2008 年，黑龙江省已有 3 个大型灌区、7 个中型灌区完成了农业水价改革试点工作[178]。

近些年来，建三江分局在农业水价改革方面进行了积极的尝试。2006 年，由建三江分局水务局牵头，在八五九农场乌苏里江灌区成立了农民用水户协会[186]，为农民参与灌区用水管理、推行农业水价改革奠定了基础。乌苏里江灌区为江河提水灌区，设计灌溉面积为 2.07 万 hm^2[186,187]，但目前实灌面积仅为 1 万 hm^2，再加上蓄水自流灌区面积 2.67 万 hm^2[4]，建三江分局地表水灌区面积仅为 3.67 万 hm^2，仅占 2009 年水田面积的 7.5%，其余均为井灌区。目前，建三江分局地表水灌区依据《关于调整黑龙江省水利工程向农业等供水收费标准的通知》（1997 年）征收农业水费，而占有绝对比例的井灌区由于农用机井是采用农民自筹或农民自筹为主、国家适当补贴方式建造的[188]，农民只负责油费、电费，不交水费，导致节水意识非常淡薄，再加上工程不配套等原因，使得建三江分局推行农业水价改革的难度较大。今后，建三江分局应多渠道筹措建设资金，加快四大临江灌区建设步伐，逐步置换井灌区；积极申请水利部农业水价综合改革暨末级渠系节水改造试点



项目[189]，提高工程配套程度，增加旱涝保收田面积；在地表水灌区建造量水堰（三角形堰、矩形堰、梯形堰等[190]）、量水槽（长喉道量水槽、巴歇尔量水槽、无喉道量水槽等[191]）等灌区量水设施，安装超声波流量计、电磁流量计、差压电容式变送器、自记式水位计等先进的测流设施[192]，在井灌区安装IC卡机井取水收费控制系统[193]，为推行农业水价改革、实行"按方收费"提供硬件支撑；摸清灌区水资源家底[194]，划分以支、斗渠为界的水文边界单元[195]，组织相关部门业务骨干按照国家相关政策合理测算灌区水价[178]，建立农民用水者协会[196]，探索超定额累进加价制度[197,198]（即在用水定额范围内实行基本水价，超定额部分实行累进加价），为建立农业用水终端水价机制[199]及推进农业水价改革提供软件支撑，进而促进当地节水型社会建设步伐。

参 考 文 献

[1] 刘润平．绿色米都 成就未来 "建三江"：国家粮食宏观调控的重要基地［J］．农产品加工，2009（3）：34－35.

[2] 秦建春，胡悦刚，秦建中．浅谈黑龙江垦区国家级生态示范区建设［J］．现代化农业，2003（5）：37－40.

[3] 单立岩，黄清．粮食战略基地建设：我国粮食安全的保障［J］．学术交流，2009（6）：111－114.

[4] 于军，赵清．破解瓶颈 加快现代水利建设 为经济社会可持续发展提供保障［J］．水利天地，2010（7）：20－23.

[5] 赵清．三江平原建三江地区农业需水量及水稻生产潜力研究［J］．现代农业科技，2009（9）：185－186，188.

[6] 王敦红，代淑英．建三江地区发展节水农业必要性分析［J］．中国新技术新产品，2009（13）：211.

[7] 郭雷，马克明，张易．建三江地区不同土地利用类型的反硝化潜力［J］．农业环境科学学报，2009，28（5）：941－945.

[8] 吴国峻．临夏州农村水利建设存在的主要问题及对策［J］．甘肃水利水电技术，2010，46（10）：43－44.

[9] 王东云，杨传静，杨秀芹．德州市安全合理利用地下水的主要措施［J］．山东水利，2010（10）：13，16.

[10] Singh R P，Nayak B R，Biswal D R，et al. Biobased polymeric flocculants for industrial effluent treatment［J］. Materials Research Innovations，2003，7（5）：331－340.

[11] 薛卫丽．充分发挥水价的杠杆作用 实现水资源的优化配置［J］．现代农村科技，2010（16）：42－43.

[12] 庄严，宋育欣，徐首天，等．水短缺，我们如何应对——写在第15个"世界水日"和第20个"中国水周"［N］．吉林日报，2007－03－27（003）.

[13] 于都．"拯救水资源刻不容缓"凤凰卫视大型公益电视行动《江河水》嘉宾主持徐刚谈"世界水日"［N］．中华新闻报，2008－03－26（A03）.

[14] 刘澜．"水危机"我们如何面对——写在第十八个"世界水日"到来之际［N］．保定日报，2010－03－22（B01）.

[15] 陈雷．严格管理水资源 推进水利新跨越——写在2011年"世界水日"和"中国水周"之际［J］．中国水利，2011，（7）.



[16] 郭雷，马克明，张易．三江平原建三江地区 30 年湿地景观退化评价 [J]．生态学报，2009，29 (6)：3126－3135.
[17] 赵清．基于灰色预测的建三江地区地下水变化趋势研究 [J]．水资源与水工程学报，2009，20 (5)：128－130，134.
[18] 国家林业局．中国湿地保护行动计划 [M]．北京：中国林业出版社，2000.
[19] 顾月月，贾欢．湿地保护地方立法存在的问题与法律对策 [J]．长春工程学院学报（社会科学版），2010，11 (2)：61－64.
[20] 鲍达明．全国湿地保护工程规划实施要点 [J]．湿地科学与管理，2007，3 (2)：18－20.
[21] 杨国霞．我国生态补偿标准研究综述 [J]．黑龙江生态工程职业学院学报，2010，23 (1)：3－5.
[22] 国家林业局退耕还林办公室．退耕还林条例 [EB/OL]．(2010－11－01) [2010－12－19]．http：//tghl. forestry. gov. cn/portal/tghl/s/2166/content—448752. html.
[23] 农业部发展计划司．农业部关于印发《全国粮食生产发展规划（2006～2020 年）》的通知 [EB/OL]．(2008－08－27) [2010－12－19]．http：//www. moa. gov. cn/zwllm/ghjh/200808/t20080827 _ 1168531. htm.
[24] 张苏平，齐援军．2006 年中国宏观经济大事辑要（下）[J]．经济研究参考，2007 (33)：2－56.
[25] 农业部新闻办公室．农业部发布实施 16 个优势农产品区域布局规划 [EB/OL]．(2009－02－18) [2010－12－19]．http：//www. moa. gov. cn/zwllm/zwdt/200902/t20090218 _ 1220849. htm.
[26] 陈秀琴，张淑芹，汤党球．三江平原利用边境河（湖）水发展水田灌溉的初步研究 [J]．黑龙江水利科技，2006，34 (2)：37－38.
[27] 李明镐，吕纯波．三江平原水稻基地建设的思考 [J]．中国水利，2007 (17)：26－27，35.
[28] 魏邦记．黑龙江省节水灌溉发展研究 [J]．黑龙江水利科技，2009，37 (6)：21－24.
[29] 贾红路．我省国家粳稻基地建设规划完成 [N]．黑龙江日报，2006－10－23 (001)．
[30] 贾红路．黑土地打造粳米之乡 [N]．黑龙江日报，2006－10－23 (005)．
[31] 张生武，陈新国，任丽．水稻需水规律研究 [J]．吉林水利，2010 (5)：4－10.
[32] 王金哲，费宇红，张光辉，等．海河平原地下水资源可持续利用前景评价 [J]．水文地质工程地质，2005 (4)：56－59.
[33] 孙长江，王磊，吴俊秀．大凌河流域水资源现状分析与可持续利用对策 [J]．南水北调与水利科技，2007，5 (2)：46－49.
[34] 田路成．加快建三江生态屏障建设　推进“中国绿色米都”新跨越 [J]．农场经济管理，2009 (7)：27－28.
[35] 钟幼兰，王启东．三江平原水资源现状及开发利用方向分析 [J]．黑龙江水利科技，2008，36 (6)：133－136.
[36] 张晓萍．黑龙江省水资源开发利用程度分析 [J]．黑龙江水利科技，2008，36 (2)：107－108.
[37] 刘加海，马艳．破解水资源瓶颈做足节水用水文章——建三江分局综合利用水资源科学节水用水纪实 [N]．北大荒日报，2010－03－26 (002)．
[38] 新华网．国务院关于印发全国土地利用总体规划纲要（2006～2020 年）的通知 [EB/OL]．(2008－10－23) [2010－12－19]．http：//www. mlr. gov. cn/xwdt/jrxw/200810/t20081023 _ 681036. htm.
[39] 新华社．《全国土地利用总体规划纲要（2006～2020 年）》[EB/OL]．(2008－10－24) [2010－12－19]．http：//www. mlr. gov. cn/xwdt/jrxw/200810/t20081024 _ 111040. htm.
[40] 孙妍，教景君．创新管理理念　巩固刚性预算成果——黑龙江建三江农垦分局推行刚性预算管理的实践 [J]．中国农业会计，2007，(5)：20－21.
[41] 谢振华，徐国春．群星璀璨农垦城——黑龙江垦区小城镇建设巡礼 [J]．中国农垦，2007 (11)：



21－23.

［42］ 王亚光．中华大粮仓　聚焦北大荒［EB/OL］．(2009－06－22)［2010－12－20］．http：//www.chinafarm.com.cn/ShowArticles.php? id＝326656.

［43］ 国家发展改革委东北振兴司．黑龙江垦区现代农业发展的现状、问题及建议［EB/OL］．(2009－06－30)［2010－12－20］．http：//chinaneast.xinhuanet.com/2009－06/30/content_16959353.htm.

［44］ 杜为长，科尔曼．中国农作物播种面积对价格变化反应的实证分析［J］．中国农村观察，1997(2)：33－38.

［45］ 朱再清，陈方源．湖北省粮食总产波动状况及其原因分析［J］．华中农业大学学报（社会科学版），2003(2)：13－16.

［46］ 李茂松，李章成，王道龙，等．50年来我国自然灾害变化对粮食产量的影响［J］．自然灾害学报，2005，14(2)：55－60.

［47］ 王川．我国粮食市场价格的影响因素分析［J］．农业经济，2010(7)：24－27.

［48］ 夏显力，甘奇慧，党夏宁，等．我国粮食综合生产能力提升的制约因素及技术措施和保障机制［J］．农业现代化研究，2010，31(5)：513－518.

［49］ 黑龙江省农垦总局统计局．黑龙江省农垦总局2009年国民经济和社会发展统计公报［EB/OL］．(2010－02－08)［2010－12－20］．http：//www.hljnktj.com/list.aspx? mid＝993.

［50］ 张秋，全敬．建三江地区水稻节水灌溉的必要性［J］．水利科技与经济，2003(3)：204.

［51］ 邢春秋，王来福，马艳．水稻节水控制灌溉技术试验总结［J］．垦殖与稻作，2005(4)：24－26.

［52］ 黑龙江省农田水利管理总站．黑龙江省水稻节水控制灌溉技术推广实施方案［EB/OL］．(2010－09－17)［2010－12－20］．http：//www.hljggxx.gov.cn/Index/Display.asp? NewsID＝386.

［53］ 种传立，宋建军，杨洋，等．建三江节水农业发展战略思考［J］．中国农垦经济，2001(3)：40－42.

［54］ DB23/T 727—2003用水定额［S］．黑龙江省质量技术监督局，2003.

［55］ 许建中，赵竞成，高峰，等．灌溉水利用系数综合测定法［J］．中国水利，2004(7)：45－47.

［56］ 杨健，张小侠，王秀茹，等．土地整理中的水资源供需分析与低压管道灌溉设计［J］．山西农业科学，2010，38(9)：35－39，44.

［57］ 赵云峰．秦皇岛市水资源供需分析［J］．黑龙江水利科技，2010，38(1)：157－159.

［58］ 绥化市北林区水务局．全国节水农业发展规划［EB/OL］．(2008－04－17)［2010－12－26］．http：//blog.163.com/blqfb@126/blog/static/71193263200831725551818/.

［59］ 陈雷．深入贯彻中央水利工作新要求　全面推进民生水利新发展——在全国水利厅局长会议上的讲话［J］．中国水利，2010(2)：1－10.

［60］ 水利部．全国节水灌溉规划［EB/OL］．(2010－06－18)　［2010－12－26］．http：//wenku.baidu.com/view/54e7cdec4afe04a1b071dea9.html.

［61］ 水利部．国务院批复《全国水资源综合规划》［EB/OL］．(2010－11－25)［2010－12－26］．http：//www.mwr.gov.cn/slzx/slyw/201011/t20101125_246091.html.

［62］ 高毅，杨文．水田节水灌溉技术综合研究［J］．内蒙古水利，2008(3)：65.

［63］ 李振峰，王守坤，沈钦平，等．乌议勃利县水田灌区节水灌溉［J］．黑龙江水利科技，2010，38(2)：224－225.

［64］ 丁瑞林，罗细平．低压管灌技术在水田节水灌溉中的应用［J］．节水灌溉，2000(4)：34－35.

［65］ 蒋宏伟，艾义龙．稻田井灌区管灌工程试验成果分析［J］．水利天地，2005(8)：41－43.

［66］ 邹桂英，毛伟东．八万亩水田“喝”上松花江水［N］．北大荒日报，2010－10－15(003).

［67］ 胥信平．以现代农业为平台　以控灌推广为手段　开创水田节水灌溉工作新局面——在全省水稻

节水控制灌溉技术推广现场会上的讲话（节选）[J]．水利天地，2009 (9)：7-10.
[68] 董英．基于黑龙江省发展水田节水灌溉的几点认识 [J]．黑龙江水利科技，2010，38 (5)：97-98.
[69] 孙小淋，杨立年，杨建昌．水稻高产节水灌溉技术及其生理生态效应 [J]．中国农学通报，2010，26 (3)：253-257.
[70] 展广军，董保才，王井士，等．水稻无水层灌溉栽培技术研究 [J]．北方水稻，2008，38 (1)：34-36.
[71] 贾宏伟，卢成．基于非充分灌溉理论的水稻田间水利用效率的计算方法 [J]．农业工程学报，2010，26 (6)：38-41.
[72] 李国胜，刘继续．虎林市水稻"浅、湿、晒"灌溉试验技术 [J]．黑龙江水利科技，2006，34 (6)：39-40.
[73] 张玉屏，朱德峰，林贤青，等．强化栽培条件下干湿灌溉对水稻生长的影响 [J]．干旱地区农业研究，2007，25 (5)：109-113.
[74] 王成才，李福欣．水稻湿润灌溉技术及其节水增产机理的分析 [J]．黑龙江水专学报，2003，30 (1)：59-60.
[75] 冯延江．黑龙江省水稻节水灌溉方式的研究 [J]．黑龙江农业科学，2010 (11)：6-8.
[76] 徐长久，张恩江．黑龙江省汤原县寒区水稻节水控制灌溉技术应用研究 [J]．黑龙江水利科技，2009，37 (6)：25-26.
[77] 彭世彰，俞双恩，张汉松．水稻节水灌溉技术 [M]．北京：中国水利水电出版社，1998.
[78] 彭世彰，徐俊增，黄乾，等．水稻控制灌溉模式及其环境多功能性 [J]．沈阳农业大学学报，2004，35 (5-6)：443-445.
[79] 安云凯．三江平原发展水稻生产应当处理好的几个关系 [J]．黑龙江水利科技，2010，38 (4)：123-125.
[80] 刘伟彬，贾凤君．水稻控制灌溉试验小区的灌水技巧 [J]．水利天地，2007 (12)：26.
[81] 申晓春，韩兵．八五七农场水稻节水控制灌溉技术分析 [J]．黑龙江水利科技，2006，34 (3)：62.
[82] 周立奎，焦艳．对水稻控制灌溉技术应用的研究 [J]．中国科技信息，2007 (12)：63-64.
[83] 邓爱明，郭龙江，孙成龙．兴凯湖灌区水稻节水控制灌溉实验研究 [J]．黑龙江水利科技，2007，35 (4)：5-6.
[84] 蔡景礼，陈志春．寒区水稻节水控制灌溉技术应用研究与示范 [J]．水利科技与经济，2008，14 (6)：504-508，510.
[85] 杜秋红，贾锡云．水稻节水控灌试验总结 [J]．北方水稻，2010，40 (3)：36-37.
[86] 徐雪高，沈杰．我国农业自然灾害风险现状、成因及应对机制 [J]．天府新论，2010 (1)：62-66.
[87] 屈宝香，李文娟，钱静斐．中国粮食增产潜力主要影响因素分析 [J]．中国农业资源与区划，2009，30 (4)：34-39.
[88] 毕红杰，姜会明．基于修正的C—D生产函数模型的吉林省粮食增产潜力分析和预测 [J]．安徽农业科学，2010，38 (19)：9944-9945.
[89] 中华人民共和国国家发展和改革委员会．全国新增1000亿斤粮食生产能力规划（2009～2020年）[EB/OL]．(2009-11-03) [2010-08-26]．http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/P020091103567866621892.pdf.
[90] 所双雨．黑龙江省委经济工作会议召开 推动"八大经济区""十大工程"建设 [EB/OL]．(2010-12-22) [2011-01-07]．http://www.hlj.gov.cn/zwdt/system/2010/12/22/010127533.shtml.



[91] 李相莉，韩金超，王士兰，等．建三江分局水利工程现状及主要问题分析［J］．现代化农业，2008（1）：17－18.
[92] 陈敏，沈华中，史光前．长江流域防汛抗旱减灾体系建设［J］．中国防汛抗旱，2009（S1）：153－164.
[93] 汪晶．铁岭市旱情分析及抗旱对策措施［J］．地下水，2010，32（5）：118－119.
[94] 徐晓波，王珑琳，乔影．东明灌区田间配套工程施工质量控制要点［J］．黑龙江水利科技，2010，38（2）：235.
[95] 刘伯超，张连辉，曲杨，等．法库县抗旱工作现状分析及应对措施［J］．农业科技与装备，2009（3）：183－185.
[96] 张成才，孙园园，王兴华．河南省抗旱应急水量供需平衡分析研究［J］．水资源与水工程学报，2010，21（5）：90－92.
[97] 陈琪，杨开滨．建三江现代农业的抗旱措施与实效［J］．中国防汛抗旱，2009（3）：80.
[98] 马庆国．切实贯彻科学发展观　精诚团结搞好三江平原水利综合规划——在三江平原水利综合规划工作动员会上的讲话［J］．水利天地，2006（9）：4－6.
[99] 马庆国．抢抓机遇　迎接挑战　努力实现水利规划计划工作跨越式发展［EB/OL］．（2010－01－29）［2011－01－11］．http：//www.mwr.gov.cn/ztpd/2010ztbd/2010nslghjhgzhy/jlfy/201001/t20100129_173716.html.
[100] 杨春喜．我省水利事业迎来加快发展的重要机遇——写在《黑龙江省人民政府关于加快水利建设大力发展现代水利的决定》出台之际［J］．水利天地，2008（9）.
[101] 水利部．农业供水末级渠系改造试点项目管理办法［EB/OL］．（2005－08－31）［2011－01－11］．http：//www.mwr.gov.cn/zwzc/zcfg/bmfggfxwj/200508/t20050831_156074.html.
[102] 余雷，伍春平．赣抚平原灌区末级渠系改造试点项目分析［J］．江西水利科技，2010，36（2）：136－139.
[103] 马艳，毛广富，冯建维．且看传统涝区如何抗旱［J］．水利天地，2009（9）：28.
[104] 张立欣，关长彤．农作物抗旱耕作技术［J］．农村科学实验，2008（4）：8，11.
[105] 周广学，李普庆，周晓东．朝阳干旱类型与粮食产量及抗旱对策［J］．安徽农业科学，2010，38（23）：12873－12875.
[106] 李树青．阜新地区抗旱耕作技术探讨［J］．内蒙古农业科技，2009（4）：99，121.
[107] 宋丽萍，栾杰．通河县防旱抗旱对策分析［J］．今日科苑，2008（12）：177.
[108] 梁钊．宁夏引黄灌区水资源短缺形势下抗旱节水应对措施［J］．宁夏农林科技，2008（6）：100－101.
[109] 骆术斌，王凯军，徐蕾．吉林省抗旱减灾体系构建分析［J］．中国防汛抗旱，2010（4）：61－64.
[110] 人民日报．中华人民共和国抗旱条例［N］．人民日报，2009－03－07（011）.
[111] 胥信平．加强各项基础准备　提高防御抗御能力　全力做好2007年防汛抗旱工作——在全省防汛抗旱工作会议上的讲话［J］．水利天地，2007（5）：1，6－7.
[112] 张洁瑜，马克明．建三江农垦分局湿地植物群落分类和排序［J］．湿地科学，2008，6（3）：359－365.
[113] 李洪亮，张鹏，徐伟，等．淮河流域平原洼地致涝原因及除涝对策措施简述［J］．治淮，2009（9）：8－9.
[114] 胡广元．浅谈防洪除涝及农田水利工程建设技术［J］．建筑设计管理，2010，27（11）：61－62.
[115] 赵兴友．农田除涝的基本措施［J］．现代农业科技，2008（23）：246.
[116] 薛学义，兰林忠．三江平原水利综合规划的重新编制问题［J］．中国水利，2007（6）：59－60.



[117] GB 50288—99，灌溉与排水工程设计规范［S］．北京：中国计划出版社，1999.
[118] 纪冰．深入贯彻落实党的十七大精神　谱写安徽水利事业发展新篇章［J］．江淮水利科技，2008（1）：3-6，17.
[119] 新华社．国家防汛抗旱应急预案［EB/OL］．（2006-01-11）［2011-01-14］．http：//www.gov.cn/yjgl/2006-01/11/content_155475.htm.
[120] 胥信平．在2007年黑龙江省防汛抗旱指挥部全体成员会议上的汇报［J］．水利天地，2007（7）：4-5.
[121] 顾晓军，谢联辉．21世纪我国农药发展的若干思考［J］．世界科技研究与发展，2003，25（2）：13-20.
[122] 田素芬，黄伙水，顾晓军．我国农药负面效应形成原因剖析［J］．武夷科学，2007，23（01）：227-233.
[123] 陈泉江．我国发展现代农业的制约因素及对策［J］．新疆农垦经济，2010（2）：52-58.
[124] 孔箐锌，陈阜．我国农田污染现状与防治对策［J］．农业工程技术（新能源产业），2010（4）：23-26.
[125] 张璋，张忠潮，李炎霖．农业环境补贴政策研究——基于农药、化肥污染视角［J］．青年文学家，2010（15）：265-266.
[126] 权桂芝．土壤的农药污染及修复技术［J］．天津农业科学，2007，13（1）：35-38.
[127] 曾靖，常春华，王雅鹏．基于粮食安全的我国化肥投入研究［J］．农业经济问题，2010（5）：66-70.
[128] 陈勇，冯永忠，杨改河．陕西省农业非点源污染现状与区域特征研究［J］．西北农林科技大学学报（自然科学版），2010，38（11）：75-83.
[129] 白明英．农业非点源污染及控制对策研究［J］．安徽农业科学，2010，38（8）：4228-4230.
[130] 彭畅，朱平，牛红红，等．农田氮磷流失与农业非点源污染及其防治［J］．土壤通报，2010，41（2）：508-512.
[131] 人民日报．中共中央关于制定国民经济和社会发展第十一个五年规划的建议［N］．人民日报，2005-10-19（001）.
[132] 王楠，郑福妹，唐浩．黑龙江垦区构建"环境友好型社会"概述［J］．黑龙江科技信息，2009（19）：104.
[133] 农业部种植业管理司．农作物数据库［EB/OL］．［2011-01-25］．http：//zzys.agri.gov.cn/nongqing.aspx.
[134] 农业部种植业管理司．生产资料数据库［EB/OL］．［2011-01-25］．http：//zzys.agri.gov.cn/huafei.aspx.
[135] 林超文，庞良玉．施肥对我国农业面源污染的影响与对策建议［J］．安徽农业科学，2009，37（35）：17668-17670.
[136] 李维峰．积极推进现代农业标准化提档升级［J］．中国农技推广，2010，26（9）：8-9.
[137] 张淑辉．测土配方施肥在农业生产中的作用、存在的问题及对策［J］．农业科技通讯，2010（8）：122-123.
[138] 段建设，肖志健，朱红英．襄樊市襄阳区耕地土壤养分现状及施肥对策［J］．现代农业科技，2010（13）：311-312.
[139] 张春荣，丁新华，施国明，等．杂交粳稻机插栽培关键技术［J］．上海农业科技，2010（4）：39-40.
[140] 孙利，黄玲娟，赵立，等．缓释肥料在水稻生产上的应用试验研究［J］．上海农业科技，2010（3）：63-64.
[141] 罗林松，孙永，杨永高．推广使用生物肥的必要性［J］．现代农业科技，2010（11）：

287，289.
[142] 邵磊．平衡施肥与生态农业中的养分协调［J］．安徽农学通报，2008，14（23）：81－82，167.
[143] 王子龙，付强，姜秋香．基于GIS与属性识别模型的土壤肥力综合评价［J］．农业工程学报，2009，25（6）：76－80.
[144] 徐竹莲，朱卫东，魏风铃，等．农药安全使用中存在的问题及对策［J］．河南农业，2010（21）：16－17.
[145] 农业部．农药安全使用规定［EB/OL］．（1982－06－05）［2011－01－26］．http：//www.moa.gov.cn/zwllm/zcfg/qtbmgz/200601/t20060120_539439.htm.
[146] 农业部农业转基因生物安全管理办公室．农药管理条例［EB/OL］．（2010－07－17）［2011－01－26］．http：//www.moa.gov.cn/ztzl/zjyqwgz/zcfg/201007/t20100717_1601266.htm.
[147] 中华人民共和国农业部．农药管理条例实施办法［EB/OL］．（1999－07－23）［2011－0126］．http：//www.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/gg/200210/t20021018_15356.htm.
[148] GB/T 8321.1—2000 农药合理使用准则（一）［S］．北京：中国标准出版社，2000.
[149] GB/T 8321.2—2000 农药合理使用准则（二）［S］．北京：中国标准出版社，2000.
[150] GB/T 8321.3—2000 农药合理使用准则（三）［S］．北京：中国标准出版社，2000.
[151] GB/T 8321.4—2006 农药合理使用准则（四）［S］．北京：中国标准出版社，2006.
[152] GB/T 8321.5—2006 农药合理使用准则（五）［S］．北京：中国标准出版社，2006.
[153] GB/T 8321.6—2000 农药合理使用准则（六）［S］．北京：中国标准出版社，2000.
[154] GB/T 8321.7—2002 农药合理使用准则（七）［S］．北京：中国标准出版社，2002.
[155] GB/T 8321.8—2007 农药合理使用准则（八）［S］．北京：中国标准出版社，2007.
[156] GB/T 8321.9—2009 农药合理使用准则（九）［S］．北京：中国标准出版社，2009.
[157] 中国农业信息网．农药标签和说明书管理办法［EB/OL］．（2008－06－06）［2011－01－26］．http：//www.moa.gov.cn/zwllm/zcfg/nybgz/200806/t20080606_1056998.htm.
[158] 邵振润，郭永旺．我国施药机械与施药技术现状及对策［J］．植物保护，2006，32（2）：5－8.
[159] 翟长远，朱瑞祥，张佐经，等．精准施药技术现状分析［J］．农机化研究，2010（5）：9－12.
[160] 麻玉香．可持续农业中的植物病害管理［J］．吉林农业，2010（9）：86.
[161] 李瑶，张志奖，付英，等．江西绿色农业产业化发展模式及对策研究［J］．江西农业学报，2010，22（7）：206－209.
[162] 李茂柏，曹黎明，程灿，等．水稻节水灌溉技术对甲烷排放影响的研究进展［J］．作物杂志，2010（6）：98－102.
[163] 陈雷．关于几个重大水利问题的思考——在全国水利规划计划工作会议上的讲话［J］．中国水利，2010（4）：1－7.
[164] 武素兰．浅论提高农业用水率的必要性及技术途径［J］．现代农村科技，2010（16）：48－49.
[165] 张利军，韩芬，董向义，等．浅析如何多途径节约农业用水［J］．内蒙古水利，2010（3）：89－90.
[166] 马通宙．论汾河灌区农业水价综合改革［J］．山西科技，2010，25（3）：42－43.
[167] 马建琴，夏军，刘晓洁，等．中澳灌溉水价对比研究与我国水价政策改革［J］．资源科学，2009，31（9）：1529－1534.
[168] 刘华．黑龙江省农业水价问题研究［J］．黑龙江水利科技，2007，35（3）：115－116.
[169] 张岳．60年水利的历史见证——党中央、国务院的治水兴水与安邦富民强国［J］．水利发展研究，2009（11）：7－13.
[170] 刘文，钟玉秀．供水价格改革60年回顾与展望［J］．中国水利，2009（19）：10－12.
[171] 王怀庆．农业水价改革遇到的问题及其对策［J］．绿色财会，2010（8）：54－56.
[172] 朱彬，魏邦记，戴钦，等．黑龙江省水权制度问题与对策研究［J］．技术经济与管理研究，

2005 (6): 115-116.
[173] 魏建华．龙凤山灌区农业供水水费财政补贴核算模式分析 [J]．黑龙江水利科技，2009，37 (4): 47.
[174] 编辑部．黑龙江省人民政府关于发布《黑龙江省水利工程供水收费标准和使用管理办法》的通知 [J]．水利天地，1987 (3): 36-38.
[175] 萝北县人民政府．关于调整黑龙江省水利工程向农业等供水收费标准的通知 [EB/OL]．(2010-04-14) [2011-01-27]．http://221.210.155.66/lb/XXLR1.ASP? ID=3309.
[176] 赵岩，闫晶怡．节水型循环经济必要性研究——以黑龙江生态省建设为例 [J]．环境科学与管理，2008，33 (2): 159-162，177.
[177] 杨德利，林剑波．浅议黑龙江垦区蛤蟆通灌区的综合治理 [J]．水利科技与经济，2008，14 (3): 243-244.
[178] 李玖颖．黑龙江省农业水价问题分析与对策 [J]．黑龙江水利科技，2008，36 (6): 15，26.
[179] 陈福生，马向东，赵庆超．续建使老灌区发挥应有的效益 [J]．水利科技与经济，2003，9 (1): 71.
[180] 刘瑞明，孙东峰，魏建华．龙凤山灌区管理体制改革经验剖析 [J]．黑龙江水利科技，2008，36 (3): 143.
[181] 宿宝江，张玉宏．木兰县香磨山灌区水价改革的再思考 [J]．水利科技与经济，2010，16 (6): 621-622.
[182] 尹景才，白建学．用水价杠杆调节供求关系 [J]．水利天地，2005 (3): 21.
[183] 张红兵．水利财务管理改革不断推进 水利投入持续增长 [J]．中国水利，2008 (24): 18-20.
[184] 聂龙涛，杨天罡，王东．基于江东灌区水价改革 [J]．黑龙江水利科技，2008，36 (4): 93.
[185] 李玖颖，刘明．黑龙江省大型灌区改革情况综述 [J]．黑龙江水利科技，2006，34 (3): 160.
[186] 陈琪，韩治国，周明．参与式管理走进乌苏里江灌区 [J]．水利天地，2006 (6): 18.
[187] 宋汉义．三江垦区地表水利用初探 [J]．黑龙江水利科技，2010，38 (5): 180-181.
[188] 王晓玲，杜秀文，刘丽艳，等．我国井灌建设可持续发展研究 [J]．中国农村水利水电，2006 (8): 6-11.
[189] 李华．第十二讲：水价改革政策及面临问题的解决对策 [J]．中国水利，2010 (2): 61-64.
[190] 杨琳，黎裕文，张文涛．三角形薄壁堰流量测验方法在山溪性小河中的应用 [J]．人民珠江，2008 (3): 65-67.
[191] 严晓军．我国灌区量水技术现状及发展趋势 [J]．中国科技信息，2010 (17): 89-90.
[192] 张玉．浅谈景电灌区量水现状及信息化量水的发展 [J]．甘肃科技，2007，23 (10): 141-142.
[193] 郑兆镇．井灌区 IC 卡系统灌溉计量的应用 [J]．地下水，2009，31 (2): 140，142.
[194] 徐小波，周和平．新疆灌区供水到户管理模式创新实践及效益 [J]．水利发展研究，2009 (1): 39-44，63.
[195] 陈丹，陈菁，陈祥，等．基于支付能力和支付意愿的农民灌溉水价承受能力研究 [J]．水利学报，2009，40 (12): 1524-1530.
[196] 蔺晓明．对灌区农业水价现状的分析与思考 [J]．中国防汛抗旱，2009 (1): 35-38.
[197] 冯广志．完善农业水价形成机制若干问题的思考 [J]．水利发展研究，2010 (8): 26-32.
[198] 王仁柱，孟骁，黄伟．黑龙江省垦区水费制度分析 [J]．黑龙江水利科技，2006，34 (6): 80.
[199] 周铭，虞国华．里石门水库灌区终端水价测算 [J]．人民黄河，2010，32 (8): 84-86.